

01174  
2 2ej.



DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Facultad de Ingeniería

MODELO DE OPTIMIZACION DE COSTOS EN  
REDES DE TUBERIAS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERIA  
(PETROLERA)

P R E S E N T A :

HECTOR RIVAS RIVAS

México, D. F.

1986

TESIS CON  
FOLIO DE CUBIERTA



## **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.

# INDICE

|                                                | Pag. |
|------------------------------------------------|------|
| Resumen                                        | 1    |
| Introducción                                   | 2    |
| Teoría                                         | 10   |
| <b>I. Modelos Gráficos</b>                     | 10   |
| <i>1.1. Algoritmo de Flujo Aumentado</i>       | 15   |
| <i>1.2. Algoritmo de Flujo Máximo</i>          | 16   |
| <i>1.3. Algoritmo de Flujo de Costo Mínimo</i> | 18   |
| <b>II. Modelos Matemáticos</b>                 | 23   |
| <i>II.1. Formulación del Modelo</i>            | 23   |
| <i>II.1.1. Modelo de Flujo</i>                 | 23   |
| <i>II.1.2. Modelo Económico</i>                | 30   |
| <b>III. Desarrollo y Aplicación del Modelo</b> | 37   |
| <b>IV. Conclusiones y Recomendaciones</b>      | 64   |
| Nomenclatura                                   | 67   |
| Referencias                                    | 70   |
| Apéndices                                      |      |
| <i>A.- Definición de Algunos Conceptos</i>     | 74   |
| <i>B.- Ecuaciones de Flujo</i>                 | 75   |
| <i>C.- Método de Newton-Raphson</i>            | 77   |

## RESUMEN

*Un sistema de recolección o distribución de gas, está formado por tuberías, válvulas, compresoras, etc., las cuales al ser interconectadas forman una red. La selección de un diseño óptimo en la red, evita erogaciones económicas innecesarias en su implantación y operación.*

*En este estudio se presenta un modelo que permite mediante un programa de cómputo, diseñar un sistema para el transporte de gas en régimen permanente. El modelo obtiene primeramente las dimensiones en los conectores (tuberías o compresoras), que satisfagan las condiciones de operación; posteriormente, asocia el costo unitario de transporte a cada conector y mediante un algoritmo de flujo se distribuye éste en la red, encontrándose cadenas de flujo de costo mínimo.*

*Mediante el análisis y comparación de varios arreglos posibles, y utilizando el costo anual equivalente como criterio de comparación, se puede obtener la mejor alternativa desde el punto de vista técnico-económico.*

*El procedimiento se aplicó a la red de distribución de gas del Estado de México. Para esto, se ensayaron varios arreglos con diferentes tamaños de diámetros y distribución de tuberías, presentándose finalmente la mejor solución.*

## INTRODUCCION

Para el transporte de grandes volúmenes de gas, de los campos donde es producido, hacia los centros de consumo, así como en la distribución necesaria para su utilización, se requiere diseñar sistemas de recolección y distribución o en algunos casos, realizar modificaciones a los ya existentes, con el fin de satisfacer la demanda dentro de las condiciones de operación requeridas, con un costo mínimo, para que exista una rentabilidad adecuada.

Al llevar a cabo esto, deben tenerse en cuenta varios aspectos, entre los cuales se pueden mencionar: satisfacer las necesidades presentes y futuras, mantener el sistema operando dentro de ciertos límites; los costos asociados con la implantación y operación del mismo deben ser lo más bajo posible.

Para lograr lo anterior, es necesario seleccionar un diseño óptimo del que puedan obtenerse las mejores condiciones técnico-económicas. La selección óptima para sistemas pequeños o con pocos elementos puede hacerse en forma empírica; el problema se incrementa en grado de dificultad a medida que los elementos del sistema aumentan, ya que las variables que tienen que ser consideradas también se incrementan.

Las condiciones de operación del sistema deben mantenerse bajo ciertos límites de seguridad, de acuerdo con las normas de resistencia establecidas para cada elemento que lo forma. Por otro lado, el sistema también debe presentar facilidades para ampliaciones o modificaciones futuras.

En el diseño y operación de un sistema de recolección o distribución de gas, un aspecto muy importante es minimizar los costos, tanto en inversión inicial como en operación y mantenimiento. Por otro lado, es importante analizar la eficiencia económica con que está operando el sistema una vez instalado, para la eliminación de erogaciones superfluas. Los aspectos económicos tienen tanto o más peso que los aspectos técnicos para la toma de decisiones respecto a la elección de un diseño o las modificaciones que se pretendan hacer a éste una vez implantado.

Cuando se diseña o se modifica un sistema de transporte de gas, es necesario considerar todos los elementos que lo integran. De este modo, si se aplica un modelo de optimización desarrollado previamente para este fin, el resultado obtenido representará costos de transporte mínimos y será aplicable para toda la red. Además, en el caso de un sistema existente, el modelo indicará en que elementos realizar cambios, en caso de que el diseño presente no sea el óptimo.

Los sistemas de recolección y distribución de gas, pueden ser analizados y modelados como redes, su diseño debe ser producto de la aplicación de un Modelo Matemático, que simule el flujo y al mismo tiempo los costos. El modelo a utilizar estará formado por ecuaciones de flujo y ecuaciones de costos relativas a cada elemento de la red. En estas ecuaciones la característica principal es su no linealidad; para la solución de este tipo de modelo matemático es necesario ayudarse de la computadora y de técnicas auxiliares de solución.

La representación de la red en términos de nodos y conectores, <sup>(22),\*1</sup> ha sido la base a partir de la cual se han desarrollado varios métodos. Flanigan <sup>(7)</sup> desarrolló un modelo, el cual utiliza las Derivadas Restringidas como técnica de optimización; en su trabajo establece que en las condiciones de flujo están comprendidas las restricciones del sistema y la función objetivo esta dada por la ecuación de costos.

Este como cualquier método de optimización utiliza variables de decisión, las cuales son manipuladas manualmente o en el programa, y variables de estado, que mantienen el sistema lógico cuando alguna variable de

1. \* Referencias al final

decisión es cambiada.

El modelo obtiene las derivadas restringidas para cada variable de decisión como un cociente de Jacobianos; el numerador está dado por las derivadas parciales de la variable de decisión y función objetivo, en el denominador se colocan las derivadas de las ecuaciones de flujo, producto de un balance de masa en cada nodo. El modelo determina qué tan alejadas están las variables de decisión del óptimo y a su vez, realiza correcciones a éstas, utilizando las derivadas restringidas.

Este modelo fué aplicado en el Instituto Mexicano del Petróleo en una primera etapa; para esto, se consideró una ecuación de costos lineal y una red con pocos elementos; los resultados obtenidos, aparentemente satisfactorios, no muestran hasta el momento los alcances y limitaciones del método, ya que el estudio no está concluído. Debido a esto, no se ha presentado en ninguna publicación.

Uno de los inconvenientes observados en la aplicación de este método, es el manejo que debe hacerse de las variables de decisión, ya que es frecuente que éstas lleguen a ser menores de cero; esto ocasiona que se tenga que repetir el procedimiento cuantas veces se presente esta situación, intercambiando variables de estado con variables de decisión.

Asimismo, si la red que se está diseñando es de tamaño considerable y las variables de decisión son numerosas, se debe calcular una derivada restringida por cada variable de decisión, trayendo esto consigo un incremento notable en los cálculos que tendrán que realizarse.

Martch y McCall, <sup>(10)</sup> a partir de la representación <sup>(22)</sup> nodal de la red y utilizando Programación Dinámica como técnica de optimización, desarrollaron un modelo, en el cual se suponen o calculan valores óptimos de presiones o gastos para toda la red como punto de partida. Posteriormente, se calcula un conjunto de condiciones óptimas (diámetros, presiones, etc.) en los conectores que satisfagan estos valores, y así calcular los costos asociados por conector.

Algunas de las desventajas observadas para la utilización de este modelo son, entre otras: que aparentemente no puede generalizarse para cualquier caso y además, se requiere cierta experiencia para la selección de los valores de operación.

Solorzano Z. <sup>(21)</sup> desarrolló un método en el cual utiliza como técnica de optimización los Multiplicadores de Lagrange. Con este método es posible determinar espaciamiento entre compresoras, presiones de succión y descarga en éstas, así como los diámetros de tuberías que

minimizan el costo de transporte. El método considera sólo dos conectores (tubería y compresora) como elementos de análisis para toda la red.

Con la utilización de este método, no es posible optimizar la red en todo su conjunto ya que las combinaciones de diferentes tamaños de diámetros no son permitidas; asimismo, las estaciones de compresión deben ser ubicadas a la misma distancia una de la otra. Por otro lado, el método no considera lo escarpado del terreno por lo cual no es posible aplicarlo a oleoductos.

Pueden citarse, asimismo, otros métodos o trabajos desarrollados (9), (16), (26) en los cuales, los autores han resuelto el mismo problema de diferentes maneras y en varios casos para situaciones específicas.

Al aplicar algunos de los métodos que se mencionan arriba, si la red que se va a analizar tiene muchos elementos, el sistema de ecuaciones no lineales por resolver es de consideración. Para su manejo se requiere mucha experiencia, desde los valores iniciales a escoger para las variables incógnitas, hasta como interpretar los resultados.

A la fecha, y para nuestro medio, no se ha desarrollado ningún modelo 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 de varias opciones posibles la más conveniente, desde el punto de vista económico.

En este estudio se presenta un modelo programado el cual es una buena herramienta para ayudar a este fin. El modelo utiliza la representación de la red en términos de nodos y conectores <sup>(22)</sup> y conceptos de teoría de gráficas; <sup>(13)</sup> calcula primeramente las condiciones en los conectores (diámetros, presiones, etc.) para el manejo de los flujos deseados; posteriormente, calcula el costo unitario de transporte por conector y el costo anual equivalente de todo el sistema en que se incurre al manejar estos flujos.

Los costos calculados servirán como base de comparación y criterio de decisión, para que el usuario, no obstante que no esté familiarizado con el modelo, pueda cambiar, agregar o quitar conectores, y mediante el análisis de varias opciones posibles, seleccionar la mejor.

Uno de los inconvenientes observados en los modelos desarrollados con anterioridad, es que estos al ser programados, sólo pueden utilizarse si se tiene instalada una capacidad de cómputo más que mediana, y el tiempo de

procesamiento requerido es de consideración, debido a la cantidad de operaciones que tienen que realizarse. El modelo presentado puede ser usado si dispone de capacidad de cómputo mediana (computadoras personales), abatiéndose con esto costos en computación.

El objetivo principal de este estudio es presentar un modelo que al aplicarse a redes que manejan gas puedan obtenerse resultados como los siguientes:

- Diseño óptimo del sistema si es nuevo o utilización óptima del mismo si ya está en operación.
- Descripción adecuada de la ubicación de los elementos de la red; por ejemplo, localización de compresoras.
- Determinar las cantidades de gas requeridas en los puntos de inyección y conducirla a los puntos de extracción a través de la red.
- Ajustar el dimensionamiento óptimo de los equipos, tuberías y accesorios de acuerdo a los existentes en el mercado.
- Obtener el costo unitario de transporte óptimo por trayectoria o ruta (si son varias.)

El método está programado para una computadora personal Columbia (VP), y puede ser utilizado sin necesidad de disco duro, en cualquier computadora compatible con la IBM PC.

# TEORIA

## I.-MODELOS GRAFICOS

### INTRODUCCION.

La teoría de gráficas es una área de las matemáticas que tiene un rango considerable de aplicaciones. Numerosos problemas en diferentes campos, tales como la Ingeniería, Química, Administración, etc., pueden ser tratados como problemas de teorías de gráficas. Con su utilización, es posible distribuir, recolectar, transportar, etc., diferentes objetos para la satisfacción de necesidades.

Una gráfica esta formada por dos partes, nodos y conectores: los nodos pueden ser localizados en un plano o pueden ser especificados como puntos de referencia sin tener localización física exacta; los conectores unen los nodos, y pueden ser trazados como líneas rectas o curvas como se muestra en la figura I.1.

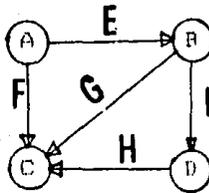


Figura I.1

La gráfica de la figura I.1 puede ser especificada simplemente señalando sus nodos A, B, C, D y sus conectores  $F=(A,C)$ ,  $E=(A,B)$ ,  $G=(B,C)$ ,  $I=(B,D)$ ,  $H=(D,C)$ ; éstos pueden considerarse como pares ordenados de nodos, donde la primera letra denota el nodo inicial o salida del conector y la segunda denota el nodo final o de llegada del conector.

\* 1

### *-Algoritmos de flujo*

Hablando de una manera explícita, un flujo es la manera de enviar objetos de un lugar a otro, por ejem. el embarque de artículos del productor al distribuidor, el movimiento de gente de sus casas a sus sitios de trabajo, el envío de gas desde uno o varios puntos de recibo, hacia uno o varios puntos de entrega; todas estas situaciones pueden ser consideradas como flujos.

Existe una gran variedad de problemas que se presentan al estar manejando flujos, siendo comunes muchos de ellos en varias situaciones; mencionándose entre otros, maximizar la cantidad de gente transportada de un lugar a otro por el sistema de transporte existente; otra situación podría ser el encontrar la trayectoria más económica en la que pudiera

\*

1. Para definiciones de los conceptos utilizados consultar apéndice A

transportarse el máximo número de unidades de gas [MMPCD], entre puntos de extracción e inyección.

Un flujo puede ser representado mediante una gráfica, siendo posible asociarle problemas como los presentados arriba. De este modo, si el problema original de flujo puede ser representado mediante una gráfica, con un alto grado de similitud y aproximación, entonces si se aplican los algoritmos para gráficas de flujo, los resultados obtenidos por medio de éstos podrán ser aplicados al problema original.

Una gráfica de flujo es, por tanto, la manera en que se envían objetos de un nodo inicial o fuente (S), hacia un nodo final u objetivo (T), utilizando para esto, una serie de conectores dirigidos y nodos intermedios; los objetos que viajan de (S) a (T) serán las unidades de flujo.

Si el número de unidades de flujo que pueden viajar a través del conector  $(x,y)$ , (siendo X y Y los nodos inicial y final) es limitada, entonces el conector  $(x,y)$  será un conector limitado. Si se denotan  $c(x,y)$  como la capacidad del conector  $(x,y)$  y  $a(x,y)$  como el costo unitario de envío del mismo, asociando estos valores a cada conector que integre la gráfica, se estará hablando de una red.

Los conectores de una gráfica pueden ser clasificados en 3 categorías.

- N: En este conjunto serán clasificados todos los conectores que no pueden tener incrementos o decrementos en sus flujos.
- I: En este conjunto serán clasificados todos los conectores en los cuales el flujo puede ser incrementado (incrementables).
- R: En este conjunto serán clasificados todos los conectores en los cuales el flujo puede ser reducido (reducibles).

De este modo, cada conector deberá pertenecer, al menos, a una de las clasificaciones mencionadas. Sea  $i(x,y)$  la cantidad de flujo que puede incrementarse en el conector  $(x,y)$ ; similarmente sea  $r(x,y)$  la cantidad de flujo que puede ser disminuida en el conector  $(x,y)$  y  $f(x,y)$  el flujo en el mismo; de aquí se obtienen las relaciones siguientes.

$$i(x,y) = c(x,y) - f(x,y)$$

y

$$r(x,y) = f(x,y)$$

Así, si se quieren mandar unidades de flujo adicionales del nodo (S) al nodo (T), se procederá a buscar trayectorias de flujo de conectores incrementables, reducibles, o una combinación de ambos. Al combinarlos se obtienen subconjuntos con las propiedades siguientes:

- 1.- Los conectores en la dirección de (S) a (T), llamados conectores hacia adelante, serán todos miembros de I

2.- Los conectores en la dirección (T) a (S), llamados conectores hacia atrás, serán todos miembros de R.

Considerese la cadena de la figura I.2, los conectores hacia adelante son (S,a), (a,b) y (d,T), los conectores hacia atrás son (c,b) y (d,c); al clasificarlos se observa que existen conectores que pertenecen a los conjuntos I y R. Asimismo, unidades de flujo adicionales pueden ser enviadas de (S) a (T).

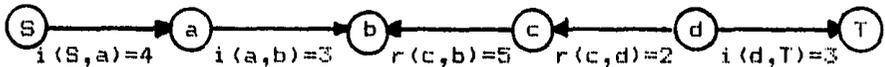


Fig. I.2

El flujo aumenta en los conectores con dirección hacia adelante y disminuye en los conectores con dirección hacia atrás. La máxima cantidad adicional de flujo que puede ser enviada a través de la cadena es el mínimo de las siguientes dos cantidades:

$\text{Min} [i(x,y) : (x,y) \text{ sea un conector hacia adelante}]$

$\text{Min} [r(x,y) : (x,y) \text{ sea un conector hacia atrás}]$

Al mínimo de esas dos cantidades se le llama el máximo flujo aumentado de la cadena, y para la gráfica de la fig. I.2, es de dos unidades. Cualquier cadena de (S) a (T), en la que puedan ser enviadas unidades adicionales recibe el nombre de cadena de flujo aumentado.

El objetivo será entonces, para el caso de una red con conectores de capacidad limitada, encontrar todas las cadenas de flujo aumentado (integrada por nodos coloreados), para el envío del máximo número de unidades posibles del nodo fuente al nodo objetivo sin violar la capacidad de algún conector; para esto se utilizan los algoritmos de flujo siguientes:

(13)

### **I.1. Algoritmo de flujo aumentado**

#### **Definición**

#### **Etapas I**

Determinar cuales conectores pertenecen a los conjuntos N, I y R. Los conectores que pertenezcan al conjunto N pueden ser ignorados por el algoritmo, ya que no es posible que halla cambio de flujo en ellos. Colorear el nodo S.

#### **Etapas II**

Colorear los conectores y los nodos hasta que el nodo T halla sido coloreado o no sean posibles mas coloraciones, de acuerdo a las reglas siguientes:

- a).-Nodo Y conector  $(x,y)$  puede ser coloreado si el conector  $(x,y) \in I$ .
- b).-Nodo Y y conector  $(y,x)$  puede ser coloreado si el conector  $(y,x) \in R$ .

Si el nodo T ha sido coloreado, entonces existe una única cadena de conectores coloreados de S a T, la cual es una cadena de flujo aumentado. Por otro lado, si T permanece sin colorear después que el algoritmo termina, entonces no

existe cadena de flujo aumentada de S a T.

(8)

## I.2. Algoritmo de flujo máximo

### Fundamentos.

Sea  $f(x,y)$  cualquier flujo que sale de S hacia T, el número de unidades que sale de cualquier nodo  $x$  ( $x \neq S, x \neq T$ ) es igual al número de unidades que entran al nodo  $x$ .

Esto es:

$$\sum_{y \in X} f(x,y) = \sum_{y \in X} f(y,x) = 0 \quad (\text{para todo } x \neq S, x \neq T) \dots (1)$$

X, el conjunto de todos los nodos.

Además, el número total de unidades de flujo que viajan a través del conector  $(x,y)$ , no debe de exceder  $c(x,y)$  la capacidad del conector  $(x,y)$ .

Esto es:

$$0 \leq f(x,y) \leq c(x,y) \quad (\text{para todo } (x,y) \in A) \dots (2)$$

A, es el conjunto de todos los conectores.

Por otro lado, el número de unidades que salen del nodo S es igual al número de unidades que entran al nodo T.

Esto es:

$$\sum_{y \in X} f(x,y) - \sum_{y \in X} f(y,S) = V \dots (3)$$

$$\sum_{y \in X} f(y,T) - \sum_{y \in X} f(T,y) = V \dots (4)$$

Cualquier flujo de S a T debe satisfacer estas cuatro condiciones; de este modo un conjunto de valores  $f(x,y)$ ,  $(x,y) \in EA$  es un flujo si y solo si satisface las relaciones (1) a (4).

### Definición

#### Etapa I

Sea S el nodo fuente y sea T el nodo objetivo. Seleccionar cualquier flujo inicial de S a T, por ejemplo, un conjunto de valores  $f(x,y)$  que satisfaga las relaciones del 1 al 4. Si ningún flujo inicial es conocido usar,  $f(x,y)=0$  para todo  $(x,y)$ .

#### Etapa II

Si  $f(x,y) < c(x,y)$  hacer  $i(x,y) = c(x,y) - f(x,y)$   
y  $(x,y) \in I$ .  
Si  $f(x,y) > 0$  hacer  $r(x,y) = f(x,y)$ , y  $(x,y) \in R$ .

#### Etapa III

Para los conjuntos I y R definidos en la etapa II aplicar el algoritmo de flujo aumentado. Si no es descubierta ninguna cadena por el algoritmo de flujo aumentado, parar; el presente flujo es un flujo máximo. De otro modo hacer los incrementos de flujo posibles a través de la cadena de flujo aumentada descubierta por el algoritmo de flujo aumentado.  
Regresar a la etapa 2.

Con lo mencionado hasta aquí, los algoritmos pueden aplicarse solamente cuando los nodos fuente y objetivo sean únicos; al presentarse el caso de que se tengan varios

nodos fuente u objetivo, o ambos, para su utilización, simplemente se debe crear un nuevo nodo fuente S, llamado superfuente y nuevo nodo objetivo T, llamado superobjetivo. Se deben unir todos los nodos fuente  $S_1$  con S por por medio de los conectores  $(S,S_1)\dots(S,S_n)$  considerando capacidad infinita; lo mismo debe hacerse en caso de que los nodos objetivo sean más de uno.

Cualquier flujo en la gráfica expandida será equivalente en la gráfica original; lo mismo, el flujo será máximo en ambas; por tanto se puede aplicar el algoritmo de flujo máximo. Una ilustración se muestra en la figura I.3.

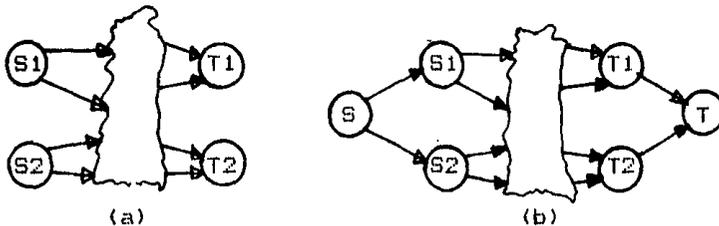


Figura I.3  
 Gráfica con varios nodos fuente y objetivo.  
 (a) Gráfica original  
 (b) Gráfica expandida

### I.3. Algoritmo de flujo de costo mínimo (8)

#### Fundamentos

Con la utilización del algoritmo anterior, se puede

encontrar la manera de enviar el máximo número de unidades de S a T, para el caso de una gráfica en la cual los conectores tengan capacidad limitada. Se considera ahora el problema de cómo enviar el máximo número de unidades v con un costo mínimo, cada conector tiene un costo asociado por unidad que viaja a través de él.

Sea  $a(x,y)$  el costo de envío de una unidad de flujo a través del conector  $(x,y)$  y  $f(x,y)$  el número de unidades que viajan en el conector  $(x,y)$ , por supuesto  $f(x,y) \geq 0$ ; sea  $v$  el número de unidades de flujo que son enviadas del nodo S al T.

El problema de flujo de costo mínimo puede ser expresado como sigue:

$$\text{Min} \left[ \sum_{(x,y)} a(x,y) f(x,y) \right] \dots \dots \dots (5)$$

Tal que:

$$\sum_y [f(S,y) - f(y,S)] = v \dots \dots \dots (6)$$

$$\sum_y [f(x,y) - f(y,x)] = 0 \quad (\text{para todo } x \neq S, x \neq T) \dots (7)$$

$$\sum_y [f(T,y) - f(y,T)] = -v \dots \dots \dots (8)$$

$$0 \leq f(x,y) \leq c(x,y) \quad (\text{para todo } (x,y)) \dots \dots (9)$$

La expresión (5) representa el costo de flujo; en la expresión (6) se afirma que el flujo neto que sale del nodo S es igual a v; por último, en la expresión (9) se requiere que el flujo en cualquier conector tome un valor entre cero

y la capacidad de éste.

El algoritmo soluciona el problema presentado en las ecuaciones (6)-(9), primero para  $p=0$ , después para  $p=1$ , luego para  $p=2$ , etc. ( $p$  es el costo total en que una unidad puede incurrir por viajar de  $S$  a  $T$ ). El algoritmo para el envío de unidades busca cadenas de flujo aumentadas, con la propiedad de que el incremento total en el costo de una unidad de envío a través de esta cadena sea igual a  $p$ . Para esto, los conectores son clasificados en los conjuntos  $I$ ,  $R$  y  $N$  y se aplica el algoritmo de flujo máximo.

El algoritmo realiza esto, asignando un entero  $p(x)$  a cada nodo  $x$  en la gráfica. Los números  $p(x)$  deben de cumplir con la condición de que  $P(s)=0$ ,  $P(t)=p$ ,  $0 < p(x) < p$  para todos los nodos  $x \neq S$ ,  $x \neq T$ . El algoritmo hace cambios de flujo sólo en los conectores  $(x,y)$  para los cuales.

$$p(y) - p(x) = a(x,y) \dots \dots \dots (10)$$

Si el algoritmo encuentra una cadena de flujo aumentada de  $S$  a  $T$  formada por conectores que satisfagan la ecuación (10), se obtendrá que el incremento total en el costo por cada unidad enviada de  $S$  a  $T$  a través de la cadena es igual a  $p$ .

## Definición

### Etapa I

(Inicialización): Hacer el flujo  $f(x,y)$  en cada conector igual a cero; así también los valores  $p(x)=0$  para todos los nodos  $x$ .

### Etapa II

(Selección de los conectores que pueden tener cambios en sus flujos): Sea  $I$  el conjunto de todos los conectores  $(x,y)$  para los cuales,

$$p(y) - p(x) = a(x,y) \\ \text{y} \\ f(x,y) < c(x,y)$$

Sea  $R$  el conjunto de todos los conectores para los cuales,

$$p(y) - p(x) = a(x,y) \\ \text{y} \\ 0 < f(x,y)$$

Sea  $N$  el conjunto de todos los conectores que no están en  $I \cup R$ . (Los conectores en  $I$  y  $R$  serán los que se consideren para los posibles cambios de flujo; de aquí se observa que los cambios de flujo serán sólo posibles en los conectores que satisfagan la ecuación (10).

### ETAPA III

(Cambios de flujo): Aplicar el algoritmo de Flujo Máximo considerando la clasificación de  $I$ ,  $R$  y  $N$  obtenida de la etapa II. Parar cuando un total de  $v$  unidades de flujo hayan sido enviadas de  $S$  a  $T$ , o cuando no sea posible enviar más unidades de  $S$  a  $T$  debido a como son clasificados los conectores dentro de los conjuntos  $I$ ,  $R$  y  $N$ . Si lo primero ocurre, parar. El flujo terminal es de costo mínimo y envía  $v$  unidades de  $S$  a  $T$ .

Si lo último ocurre, verificar si el presente flujo es un flujo máximo de  $S$  a  $T$ . (Esto es hecho verificando si en el corte generado por la última coloración del algoritmo de flujo aumentado no es posible enviar unidades adicionales). Si es así, parar, porque no es posible enviar más unidades de flujo y el flujo anterior es un flujo de costo mínimo. Sino ir a la etapa 4.

#### ETAPA IV

(Cambios en los números de los nodos): Considere la última coloración hecha por el Algoritmo de Flujo Aumentado. (Recordar que el Algoritmo de Flujo Aumentado es una subrutina del Algoritmo de Flujo Máximo que es usado como subrutina en este algoritmo). Incrementar por, +1 el número del nodo  $p(x)$ , si este nodo está sin colorear. (Observe que  $p(t)$  se incrementa en +1 dado que no está coloreado, sino otra cadena hubiera sido descubierta). Regresar a la etapa II.

De este modo, con la aplicación del algoritmo de flujo de costo mínimo, es posible enviar un máximo número de unidades  $v$ , de el nodo inicial (S) al nodo final (T), con la característica de que serán seleccionadas sólo las trayectorias que representen un costo mínimo.

## II. MODELOS MATEMATICOS

### *Introducción*

Un sistema de recolección o distribución de gas está formado por tuberías, compresoras, válvulas, etc.; las cuales están interconectadas de tal manera que permitan el flujo de uno o más puntos de inyección a uno o mas puntos de extracción.

Al diseñar o modificar un sistema con las características mencionadas, se requiere de un modelo matemático que pueda simular de una manera integral el flujo a través de todos los elementos que lo forman. Asimismo, el modelo debe considerar la magnitud de las inversiones y erogaciones necesarias en que se incurrirá en caso de su implantación; el resultado de su aplicación debe, por tanto, llevar a la selección de un diseño final, el cual debe tener como característica principal ser el mejor desde el punto de vista técnico-económico.

### *II.1. Formulación del modelo*

#### *II.1.1.-Modelo de flujo.*

En la revisión de la literatura se encontró que el método

(22), (23)

presentado por M. A. Stoner puede ser utilizado para simular el comportamiento de un sistema que maneja gas en régimen permanente. Este ha sido utilizado en el Instituto Mexicano de el Petróleo (11), (20) y Petróleos Mexicanos, probándose en la práctica su validez al aplicarse a redes de recolección y distribución de tamaños grandes y medianos, para el cálculo de presiones, gastos y potencias de compresoras.

El método de Stoner utiliza la representación gráfica de los elementos de la red en términos de nodos y conectores, como se muestra en la figura II.1. El modelo matemático es obtenido de la aplicación de un balance de masa a cada nodo del sistema; de este modo, al aplicar la ley de conservación de la masa, se establece que la suma algebraica de los gastos (q), que entran o salen de un nodo a través de los conectores, más el gasto (Q), que se adiciona o se extrae del sistema a través de ese nodo debe ser cero.

La ecuación obtenida del balance de masa aplicado a cualquier nodo será:

$$F = \sum_{j/(i,j) \in EA} q_{ij} + Q_i = 0 \quad (i \in X, \dots, 11)$$

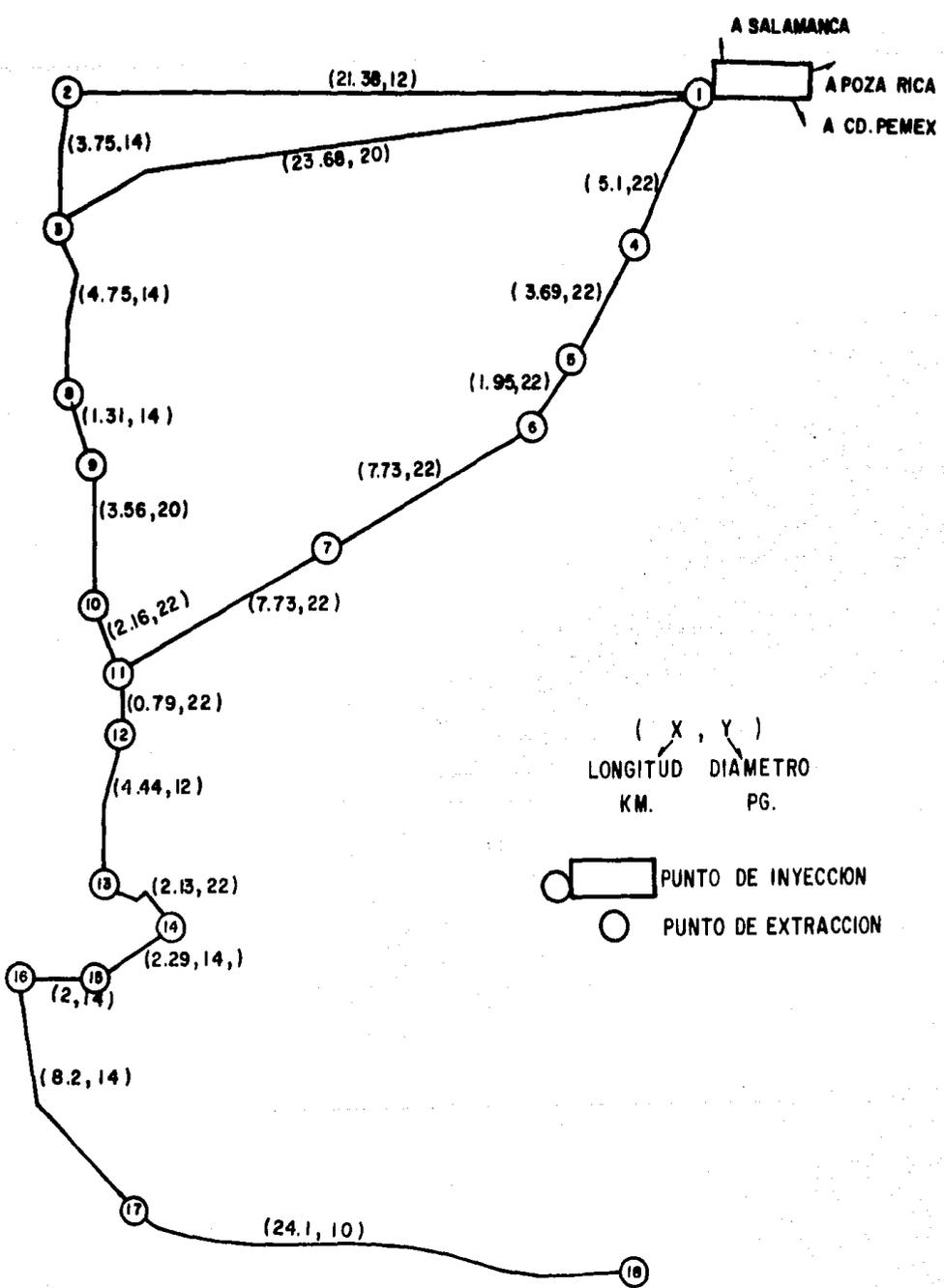


FIG. II. 1  
 EJEMPLO DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCION DE GAS

De donde  $S_{ij}$  es una variable que indica el sistema de

flujo  $* i$  y  $j/(i,j)EA$  representa todos los elementos relacionados con el nodo  $i$ ; a estas ecuaciones se les conoce como ecuaciones de balance en los nodos.

**\*\*2**

Existen varias ecuaciones que relacionan el gasto que es manejado en los conectores; estas pueden sustituirse en la ecuación (11) para obtener 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.

En una red para el manejo de gas pueden existir diferentes tipos de conectores (tuberías, compresoras, válvulas, reguladores, etc.); sin embargo, esta discusión se restringirá a tuberías y compresoras.

Cuando el sistema de nodos y conectores está balanceado,  $F_i$  será cero en todos los nodos, los flujos externos  $Q_i$

-----  
1. \* Por convención  $S_{ij} = 1$  cuando el flujo es del nodo  $i$  al nodo  $j$  y  $S_{ij} = -1$  en caso contrario.

2. \*\* Las ecuaciones de los diferentes conectores pueden ser encontradas en el apéndice B

también estarán balanceados, así:

$$\sum_{i \in X} Q_i = 0 \dots \dots \dots (12)$$

El problema consiste en determinar un conjunto de valores  $Q_i$  y  $P_i$  para toda  $i$  en  $X$  y un conjunto de valores  $D_{ij}$  y  $H_{ij}$ , para toda  $j/(i,j) \in A$  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  $2N+M$  incógnitas ( $N$  valores de  $P$ ,  $N$  de  $Q$  y  $M$  de  $D$  o  $HP$ ), por lo que se requiere asegurar valores a  $N + M$  variables, quedando  $N$  variables como incógnitas. La asignación de valores debe hacerse de tal modo que las ecuaciones sean linealmente independientes.

Como la suma algebraica de los gastos exteriores debe ser igual a cero, si se desea fijar los gastos, éstos 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 ecuación (12) es dependiente de las  $N$  ecuaciones (11).

Las ecuaciones que resultan al sustituir las ecuaciones que relacionan el gasto  $Q_i$  en la ecuación (11), son no

lineales. Un método para resolver este tipo de sistemas de ecuaciones es el procedimiento iterativo Newton-Raphson

\* 3  
para N dimensiones.

Debido a que es un proceso iterativo, es necesario proporcionar a las incógnitas valores iniciales supuestos. 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 el conjunto de valores corregidos, satisfaga al conjunto de ecuaciones (11) dentro de cierta tolerancia.

Como ocurre con cualquier procedimiento iterativo, la convergencia del método estará supeditada a la selección inicial de los valores de las incógnitas. En este tipo de problemas, para la convergencia es recomendable usar factores de aceleración, <sup>(23), (11)</sup> los cuales multiplicados por las correcciones acercan mas rápido a la solución del sistema. De este modo, de acuerdo con el procedimiento, se nota que en cada iteración se tiene que resolver un sistema de N ecuaciones lineales.

La estructura de una matriz típica se muestra en la

-----

3. \*En el Apéndice C se presenta una breve descripción de el Método Newton-Raphson.

fig.II.2, ésta resulta de aplicar el procedimiento al sistema de recolección mostrado en la fig.II.1. En la figura, las "X" representan a los elementos que son diferentes de cero. Un método eficiente es considerar el concepto de almacenamiento compacto de los elementos de la matriz presentado por A. Chang, <sup>(4), (23)</sup> mediante el cual sólo los elementos diferentes de cero se almacenan en forma vectorial y utilizar estos vectores para aplicar el método de eliminación de Gauss.

Al aplicar el método de eliminación de Gauss en una matriz rara, normalmente los elementos diferentes de cero tienden a incrementarse, lo cual produce un mayor número de cálculos. Para evitar esto, es recomendable realizar un ordenamiento de las incógnitas y las ecuaciones; este ordenamiento se puede lograr, si se utiliza el algoritmo desarrollado por T. Limón, <sup>(11)</sup> el cual proporciona un ordenamiento óptimo o cercano al óptimo en la mayoría de los casos.

Este ordenamiento está basado en la manera en que se proporcionan los conectores, en donde, se toma como primer nodo el nodo inicial del primer conector, como siguientes nodos los que están conectados al primero, luego se toman los nodos que están conectados al segundo nodo y así sucesivamente.



necesidades presentes, y a su vez, permitan incrementos en

(25)

los gastos, cuando esto sea necesario. El objetivo de esto es que el costo unitario de transporte no sea muy alto para la satisfacción de la demanda presente, y de presentarse un aumento futuro en la demanda sea solucionado sólo con la adición de estaciones de compresión.

El diseño final seleccionado, después de haber analizado y comparado las alternativas posibles, será aquel que garantice un costo unitario mínimo de transporte y satisfaga las restricciones técnicas impuestas por las condiciones de flujo y operación.

En la revisión de la literatura, se encontró que las ecuaciones presentadas para este fin por Solorzano Z.,<sup>(21)</sup> podían ser utilizadas para representar los costos de inversión, operación y mantenimiento, ya que consideran con bastante confiabilidad todos los parámetros que intervienen en el diseño de un sistema de transporte de gas, formado por tuberías y compresoras que son los elementos considerados en este trabajo. Estas ecuaciones y sus componentes son citados a continuación.

a) Costo de la tubería.

El costo de la tubería está formado de dos componentes, el costo de colocación y el costo del material; estos

costos, a su vez, se pueden desglosar en varios componentes. Sin embargo, todos pueden ser agrupados en la expresión siguiente, que permite calcular la inversión inicial necesaria en la tubería.

Esto es:

$$CT = 28.2 * \left[ \frac{P_1^2}{2 * (SFET - P_1)} + \frac{P_1^2}{4 * (SFET - P_1)} \right] * (AI * D^2 + BI * D^3), [$/MILLA] \dots (13)$$

En la ecuación anterior, primero se calcula la cantidad de material necesario [TON/MILLA] para la construcción de la línea. Para esto, se considera el peso del acero, el diámetro interno del tubo y el espesor de pared <sup>(1)</sup> del mismo, el cual es una función de la presión máxima de operación del sistema, esfuerzo máximo permisible y factores de diseño de la tubería.

Una vez que es conocida la cantidad de material necesario, se calcula el costo del mismo, así como los costos en que se incurrirá para su colocación. Este procedimiento se simplifica considerando que en la práctica es posible establecer relaciones lineales para ambos costos [\$/TON] en función del diámetro.

Estas relaciones son establecidas considerando un costo

fijo que es independiente del diámetro y otro que varía de acuerdo a éste. Así, al multiplicar cada uno de estos costos por la cantidad de material necesario, se obtiene la inversión inicial necesaria por milla de tubería.

Dado que los diseños son bienes capitalizables sujetos a depreciación, tienen una vida útil limitada, <sup>(14)</sup> se debe de cubrir un costo adicional para la justificación de la inversión, involucrándose así, un factor de capitalización por medio de el cual es posible obtener el costo anual por milla como:

$$CAUE=CT* \left[ \frac{i*(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] , \text{ [$/AÑO/MILLA]} \dots (14)$$

Otro componente de importancia en el costo total de la tubería, son los costos de operación y mantenimiento; éstos pueden ser expresados como una cantidad fija  $F_i$  [\$/AÑO/MILLA], esta cantidad puede ser sumada a la expresión (15) y así obtener el costo total anual por milla.

Para conocer el costo total anual de la tubería, bastará multiplicarlo por su longitud correspondiente obteniendo:

$$CAUET = (CAUE + F_1) * L, [\$/\text{AÑO}] \dots (15)$$

Asimismo, si se desea conocer el costo unitario de transporte correspondiente a la tubería, se deberá relacionar el costo total con el número de unidades que viajan al año a través del conector (tubería).

$$CUT = \frac{CAUET}{Q_t}, [\$/\text{MMPC}] \dots (16)$$

En este caso,  $Q_t$  se refiere a el gasto promedio total transportado a través del conector en el año  $t$ .

#### b) Costo de Compresión

Para el cálculo de la inversión inicial, sólo se debe considerar la potencia necesaria (HP) que satisfaga al modelo de flujo y el costo inicial instalado de compresión  $X_c$ , [\$/HP].

$$CC = HP * X_c, [\$] \dots (17)$$

Dado que las compresoras son bienes capitalizables, a la inversión se le debe dar el mismo tratamiento que para el caso de la tubería. Si la vida útil de la compresora es igual a la de la tubería, así como la tasa de interés, se aplica el factor de la ecuación (14), en caso contrario:

$$CAUE = CC * \left[ \frac{r * (1 + r)^m}{(1 + r)^m - 1} \right] , \text{ [\$ / AÑO] } \dots (18)$$

El combustible utilizado por las compresoras y los costos de lubricantes y supervisión, son elementos que debido a su magnitud, deben de ser considerados en el análisis económico.

El costo de combustible COM [\$/HP/AÑO] puede determinarse relacionando el consumo de combustible de la compresora, para la producción de un [HP/HR] con el poder calorífico del mismo, multiplicándolo por el precio unitario de éste.

Si CLMS [\$/HP/AÑO] es el costo de supervisión, lubricantes, etc., entonces, el costo total será:

$$CAUEC = CAUE + (CLMS + COM) * HP , \text{ [\$ / AÑO] } \dots (19)$$

Si se desea conocer el costo unitario de transporte en el conector (compresora).

$$CUC = \frac{CAUEC}{Qt} , \text{ [\$ / MMFC] } \dots (20)$$

De este modo, con las expresiones (16) y (20), es posible calcular el costo de transporte unitario por conector, y

con las expresiones (15) y (19), el costo anual total, dependiendo si se trata de tuberías o compresoras.

Una vez que ha sido calculada la capacidad que es posible manejar en el conector para las condiciones de flujo dadas, así como el costo unitario de transporte con los modelos de flujo y económico respectivamente, ambos valores son asociados a cada conector para la aplicación posterior del algoritmo de flujo de costo mínimo.

### III. DESARROLLO Y APLICACION DEL MODELO

Para el desarrollo del presente trabajo se elaboró un programa de cómputo, el cual para la solución del problema, asocia por medio del modelo de flujo el gasto que puede ser manejado en el conector. Asimismo, con el modelo económico se obtiene el costo unitario de transporte en que incurrirá una unidad al viajar a través del conector.

Una vez, que a cada conector se le ha asociado su costo y su capacidad de acuerdo con las condiciones de flujo requeridas, se utiliza el algoritmo de flujo de costo mínimo para encontrar las trayectorias de flujo requeridas y el costo de su utilización. El diagrama de flujo del procedimiento general se muestra en la figura III.1. <sup>\*1</sup>

A continuación se presenta una descripción breve de las etapas que integran el programa.

a).--Lectura de datos.

En esta parte se proporcionan al programa algunos datos, como densidad del gas, temperaturas base y media de flujo, eficiencia de transporte, y ecuación de flujo a usar en los conectores (tuberías).

-----  
1. \* Todas las tablas y figuras pueden ser consultadas al final del capítulo.

Posteriormente se suministra información relativa a los nodos y conectores. En esta parte es donde se establecen las incógnitas; si el diseño es nuevo, pueden dejarse algunas incógnitas en los conectores (potencia o diámetro), fijando las condiciones (presión o gasto en los nodos). Por otro lado, si el sistema a analizar ya está instalado, se pueden fijar las condiciones en los conectores y dejar las incógnitas en los nodos.

Como el programa, para la solución del sistema de ecuaciones resultante de la aplicación del balance de masa en los nodos, debe de verificar que se cumpla la ecuación (12), es necesario suministrar una serie de valores supuestos a las incógnitas, los cuales, al no cumplir con la mencionada ecuación, son corregidos mediante un procedimiento de solución iterativo.

Otra información que es necesario suministrar es la relativa a los componentes de la ecuación de costos, tales como, vidas útiles de las instalaciones, costos de operación y mantenimiento, etc.

Por otro lado, si los puntos de extracción o inyección son más de uno, esto también debe de suministrarse como dato, especificando el nodo inicial o final que deberá unirse al supernodo inicial o final.

b).-Modelo de Flujo.

Para la programación de este modelo se tomó como base el diagrama de flujo y los algoritmos desarrollados por T.

(11)  
Limón, así como las modificaciones y agregados

(12)  
realizados por Mejía V. El programa primero realiza un ordenamiento en los nodos, para luego calcular las ecuaciones de balance (11), y las derivadas con respecto a las incógnitas. Con los cálculos anteriores se genera el vector para la aplicación del método de Newton-Raphson, en caso de que las ecuaciones (11) no cumplan con alguna tolerancia preescogida.

Para el proceso de inversión de la Matriz, se utilizan las características de ésta, considerando sólo los elementos diferentes de cero. El diagrama de flujo correspondiente es mostrado en la figura III.2.

c).-Modelo Económico.

Una vez que ha sido determinado el flujo y sus condiciones por medio del Modelo de Flujo, el programa procede a determinar el costo unitario de transporte, para esto relaciona el costo anual equivalente del conector con el gasto anual manejado en éste. En esta parte el programa pregunta si la instalación es nueva o ya esta en operación.

El diagrama de flujo correspondiente se muestra en la figura III.3.

d).-Algoritmo de Flujo de Costo Mínimo.

Una vez que han sido asociados los costos y capacidades a cada conector, el programa verifica si los puntos de extracción o inyección son más de uno; en este último caso, el programa aumenta el tamaño de la red mediante una serie de conectores imaginarios con costo cero y capacidad infinita, luego se procede a la aplicación del Algoritmo de Flujo de Costo Mínimo, para encontrar todas las cadenas de flujo posibles, así como el costo unitario total de su utilización. El diagrama de flujo correspondiente es mostrado en la figura III.4.

e).-Aplicación del modelo.

Para ilustrar el manejo del modelo propuesto, se aplicó el procedimiento descrito, al sistema de distribución de gas del Valle de México, ubicado en la zona periférica de la Ciudad de México.

La información disponible es producto de un trabajo desarrollado en el Instituto Mexicano del Petróleo, <sup>(18)</sup> para la aplicación de un modelo de régimen variable. Este estudio data de 1976, por tanto, la distribución mostrada

no representa fielmente la actualidad de el sistema, pero permite mostrar el funcionamiento del modelo.

A continuación se presentan algunos de los datos necesarios para que pueda trabajar el modelo de flujo, de la información disponible sólo se tomó en cuenta la distribución de los puntos de inyección o extracción (nodos), que se muestran en la figura III-5 donde aparece también la longitud (Km.) que los separa; en la tabla siguiente se muestran los gastos que se requieren extraer en estos nodos.

| NODO  | GASTO<br>(MMPCD) | PRESION<br>(LB/PG2) |
|-------|------------------|---------------------|
| CARPI | ---              | 300                 |
| TULTI | 10               | ----                |
| LECHE | 12               | ----                |
| ANAH1 | 16               | ----                |
| ROMAN | 16               | ----                |
| COMUN | 8                | ----                |
| RREME | 0                | ----                |
| STEXC | 24               | ----                |
| TULPE | 5                | ----                |
| CGORD | 12               | ----                |
| JUANI | 15               | ----                |
| VALLE | 14               | ----                |
| 10MAR | 47               | ----                |
| CAMAR | 9                | ----                |
| ANA7B | 9                | ----                |
| ANABO | 12               | ----                |
| SPIND | 12               | ----                |
| COAPA | 6                | ----                |

TABLA III-1

Además se consideraron los parámetros siguientes:

Presión Base=14.7 lb/pg<sup>2</sup>  
Temp. Base=60 Fare.  
Temp. Media de Flujo=104 Fare  
Densidad Relativa del Gas=0.65

La información necesaria para el modelo económico, fué  
(21)  
tomada del trabajo de Solorzano Z. y se da a  
continuación:

|                   |              |
|-------------------|--------------|
| Yo= 220 (DOL/TON) | SI= 60000PSI |
| Go= 180 (DOL/TON) | F1= .72      |
| YM= 4.583         | E1= 1        |
| GN= 3.75          | T1= 1.       |
| i= 15% ANUAL      | Fi= 0        |
| n= 15 AÑOS        |              |

#### *Alternativas de Solución*

Desde su inicio, se partió del hecho de que no existía ningún diseño previo, se trazaron los conectores para la union de los nodos y permitir el flujo. Las trayectorias de flujo fueron hechas por principio considerando que el gas viajara lo menos posible, y que éste llegara a buena presión para usos posteriores en los nodos. No se trataron todas las trayectoria posibles sino sólo las que se pensó necesarias y mas lógicas.

Para esto, fueron realizadas 4 corridas con el modelo de

flujo solamente, ensayando varios juegos de diámetro de tubería y la información relativa a gastos en los nodos, el resultado de la última corrida se encontró satisfactorio.

Los resultados son mostrados en la figura III.6 y tabla 2; se observa que con este arreglo, es posible manejar los gastos necesarios en cada nodo y las presiones a las que es entregado el gas permiten que a éste se le pueda utilizar o distribuir posteriormente.

Una situación interesante es la que se presenta en el nodo Coapa, se esperaba en un principio que el flujo podía llegar al mismo a través de los tres conectores unidos a él; sin embargo, debido a la caída de presión presentada entre los nodos Rrem y Spino esto no es posible; de la tabla 2, se observa que la presión manejada en el nodo Coapa es mayor que la del nodo Spino, lo cual ocasiona flujo en la dirección COAPA-SPINO, que aparece en la misma con signo negativo.

Para el arreglo mostrado en la figura III-6, es posible proceder a evaluarlo económicamente no importando la forma en que están siendo manejados los flujos, o realizar algunos cambios más en la distribución de los conectores del mismo, como puede ser cambiar la dirección de el flujo en el conector SPINO-COAPA y permitir el flujo COAPA-SPINO, evitándose así el contraflujo ya mencionado.

Como se observa, los cambios que son posibles sólo para el nodo Coapa son varios; la decisión sobre cambiar o quitar conectores depende mucho de la observación y lógica que se tenga en el diseño de este tipo de sistemas y lo familiarizado que se esté con el modelo aquí presentado; una selección adecuada evita realizar corridas innecesarias con el programa.

Al continuar con el proceso de selección de la mejor alternativa para el arreglo de la figura III-6, se decidió considerar el nodo Coapa como un punto de extracción final, al cual, el gas podía ser enviado por cualquiera de los tres conectores unidos a él.

Así, se desconectó la gráfica considerando como primera opción el conector CARPI-COAPA, el arreglo correspondiente se muestra en la figura III-7, en la cual aparecen también los resultados obtenidos, que a sus vez, sirven de referencia para comparar otras alternativas.

Se realizaron otras dos corridas para evaluar la conveniencia del conector SPINO-COAPA o JUANI-COAPA, se encontró que la alternativa más conveniente económicamente es aquella en que el gas es enviado al nodo Coapa a través del conector JUANI-COAPA.

Estas dos corridas se hubieran evitado observando que si los tres conectores manejan el mismo gasto, el que presenta

un costo unitario mínimo de transporte es JUANI-COAPA, ya que sus puntos inicial y final están más cercanos que en los otros dos.

Por otro lado, de la figura III-7 se observa que el nodo Leche recibe el gas a través de los conectores CARPI-LECHE, CARPI-TULTI y TULTI-LECHE, el primero y el último tienen la misma dirección y se puede decir que son paralelos. Se decidió permitir flujo a través de LECHE-TULTI y se anuló el conector CARPI-TULTI, dejando el diámetro en el conector CARPI-LECHE como incógnita.

Se obtuvo que con un diámetro de 22 pulgadas en el conector, podía manejarse el gasto del conector anulado y el que llevaba él mismo en el arreglo anterior, procediéndose a evaluarlo como una alternativa más.

Como los flujos, al realizar cambios en los conectores de algún nodo, pueden sufrir modificaciones en sus trayectorias, o puede cambiar el costo unitario de transporte debido a las variaciones en el diámetro o la potencia; se corrió el programa con el arreglo mostrado en la figura III-8, que a su vez considera el conector SPIND-COAPA.

Por último se corrió el programa considerando el conector JUANI-COAPA, que ya había sido seleccionado con anterioridad, cuyo arreglo es mostrado en la figura III-9.

Al analizarlo económicamente se encontro que es el que representa la mejor alternativa, ya que fué el que observó un costo anual equivalente más bajo.

En la tabla 3 se presenta la distribución de diámetros, presiones y gastos para este arreglo; asimismo, en la tabla 4 se presentan los costos unitarios por conector, anexando el listado obtenido en el que se detalla la manera en que está siendo manejado el flujo en la red, así como los costos unitarios en que incurre el gas al viajar desde el nodo inicial hasta los nodos en los que es entregado el gas.

El total de corridas realizadas para la selección de esta alternativa fué de cuatro en la parte correspondiente al modelo de flujo, y cinco con el programa completo, de las cuales se hubieran podido evitar dos.

De esta manera, con el programa es posible determinar las características en los conectores para diseños nuevos, que satisfagan las condiciones de operación deseadas en los nodos; a su vez, para diseños ya instalados, permite, tomando en cuenta las características de los conectores, determinar las condiciones en los nodos.

El programa, para efectuar el análisis económico del diseño, distribuye el flujo en la red de acuerdo a la capacidad de los conectores y los costos unitarios de los

mismos, busca siempre que éste sea enviado hacia los nodos de extracción a través de los conectores de menor costo, encontrando cadenas de flujo de costo mínimo.

En ocasiones se realizan corridas innecesarias con el programa; de la observación de los resultados obtenidos en las corridas anteriores, se detecta que no era necesaria alguna de ellas. Sin embargo, esto no afecta el resultado final, con la experiencia se van evitando estas corridas.

La selección de la mejor alternativa puede hacerse comparando los resultados obtenidos del costo anual equivalente de cada una de ellas. Esta situación resulta muy sencilla de manejar, sobre todo para personas que no están muy familiarizadas con el modelo.

Una vez que se ha seleccionado el modelo final, se deberá verificar mediante algún catálogo de tuberías, si los diámetros obtenidos están disponibles comercialmente; en caso de que algunos no se encuentren, se deberá repetir el cálculo considerando los diámetros más próximos.

PROCEDIMIENTO GENERAL

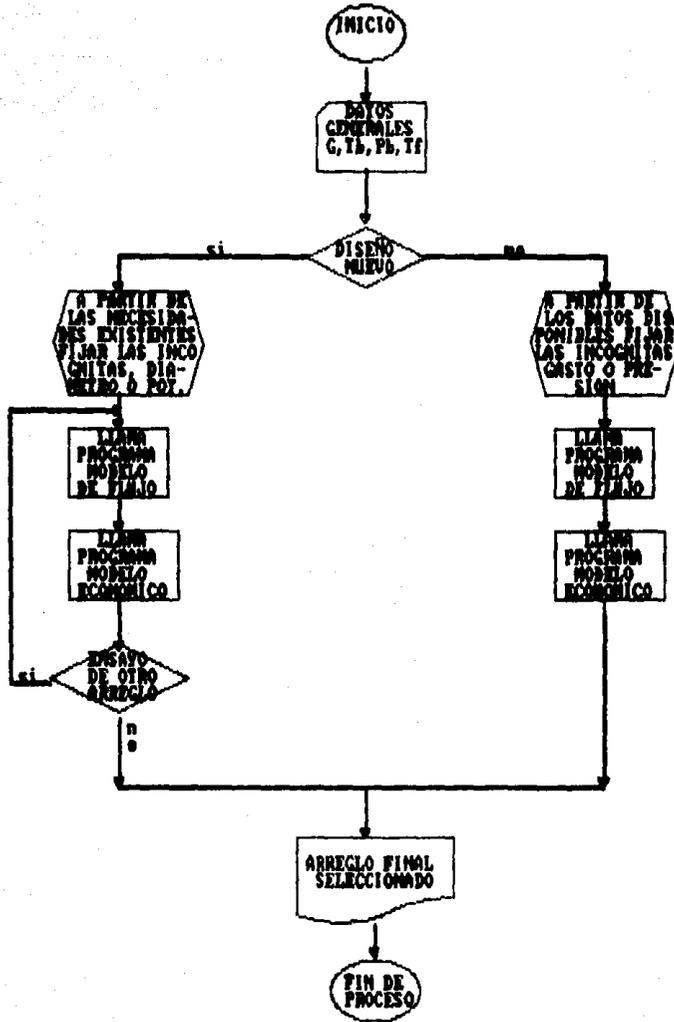


FIG. III.1

MODELO DE FLUJO

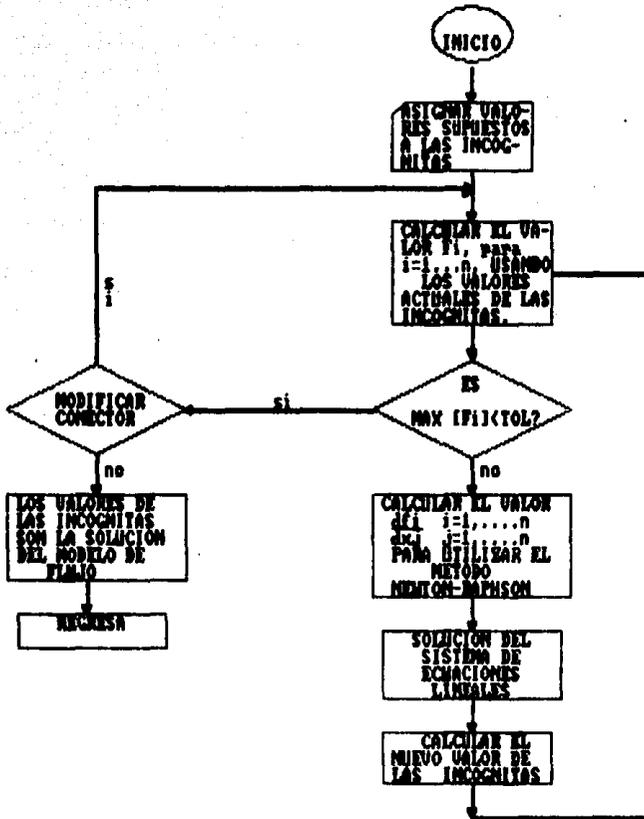


FIG. III.2

# MODELO ECONOMICO

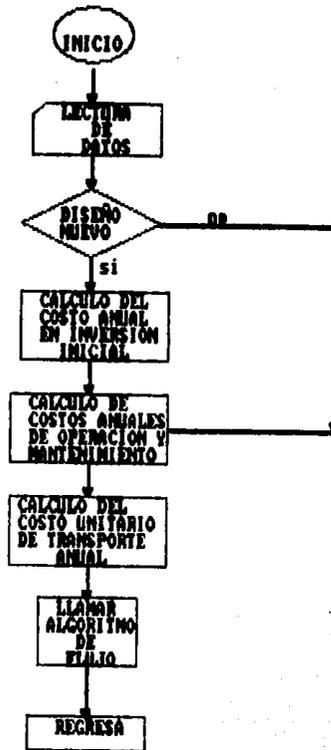


FIG. III.3

ALGORITMO DE FLUJO DE COSTO MINIMO.

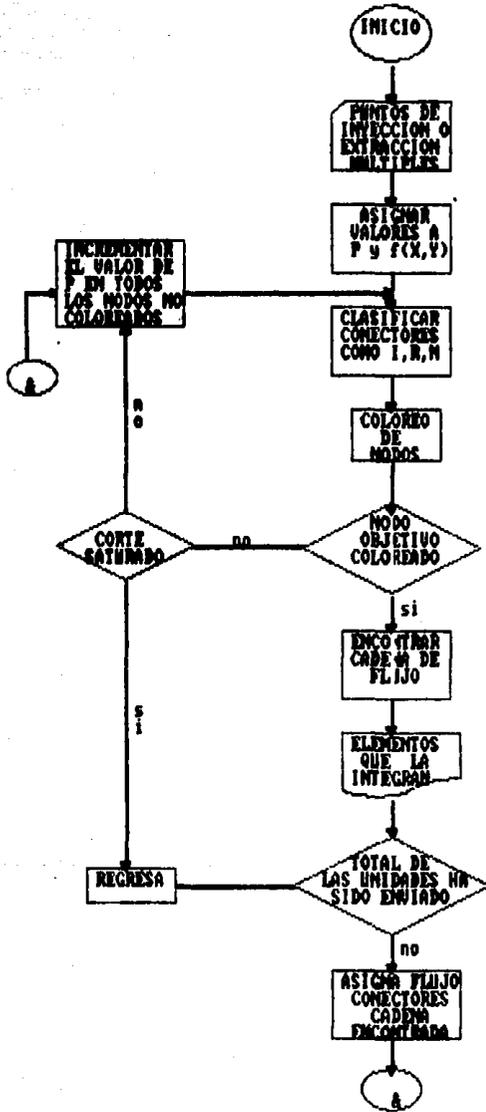


FIG. III.4

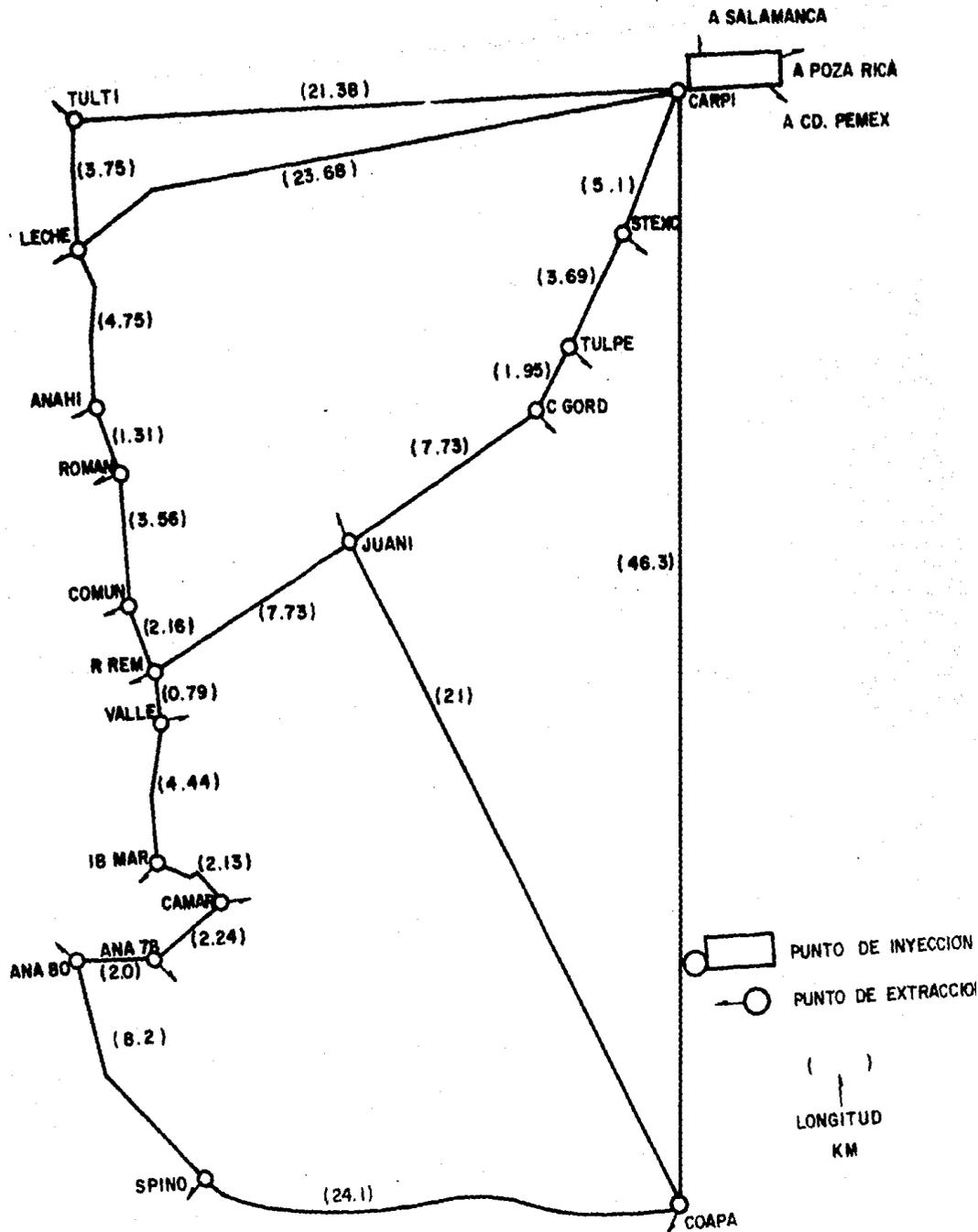


FIG. III. 5

RESULTADO CORRIDA No. 1  
SE ALCANZO CONVERGENCIA EN 8 ITERACIONES

| NODOS        |            | IDENT | TIPO | TUBERIA        |                  | COMPRESORA<br>POTENCIA<br>HP | COEFICIENTE<br>DE<br>TRANSMISION | FACTOR DE<br>CORRECCION<br>DEL CONEC | GASTO<br>MPCD | PRESIONES |                |
|--------------|------------|-------|------|----------------|------------------|------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|---------------|-----------|----------------|
| INICIAL<br>I | FINAL<br>J |       |      | LONGITUD<br>KM | DIAMETRO<br>PULG |                              |                                  |                                      |               | ENTR.     | SAL.<br>LB/PG2 |
| CARPI        | -TULTI     | TUB1  | TUB  | 21.38          | 16               |                              | .29                              | .72                                  | 53.58         | 300       | 256.31         |
| TULTI        | -LECHE     | TUB3  | TUB  | 3.75           | 16               |                              | .71                              | .72                                  | 43.58         | 256.31    | 250.7          |
| CARPI        | -LECHE     | TUB2  | TUB  | 23.68          | 16               |                              | .28                              | .72                                  | 53.81         | 300       | 250.7          |
| LECHE        | -ANAHU     | TUB4  | TUB  | 4.75           | 16               |                              | .63                              | .72                                  | 85.39         | 250.7     | 222.21         |
| ANAHU        | -ROMAN     | TUB5  | TUB  | 1.31           | 16               |                              | 1.22                             | .72                                  | 69.39         | 222.21    | 216.57         |
| ROMAN        | -COMUN     | TUB6  | TUB  | 3.56           | 16               |                              | .73                              | .72                                  | 56.39         | 216.57    | 205.99         |
| COMUN        | -RREME     | TUB7  | TUB  | 2              | 16               |                              | .98                              | .72                                  | 48.39         | 205.99    | 201.43         |
| CARPI        | -STEXC     | TUB8  | TUB  | 5.1            | 16               |                              | .61                              | .72                                  | 101.47        | 300       | 264.05         |
| CARPI        | -COAPA     | TU21  | TUB  | 46.3           | 10               |                              | .06                              | .72                                  | 15.15         | 300       | 210.93         |
| STEXC        | -TULPE     | TUB9  | TUB  | 3.69           | 16               |                              | .72                              | .72                                  | 77.47         | 264.05    | 247.13         |
| TULPE        | -CGORD     | TU10  | TUB  | 1.95           | 16               |                              | .99                              | .72                                  | 72.47         | 247.13    | 238.87         |
| CGORD        | -JUANI     | TU11  | TUB  | 7.73           | 16               |                              | .49                              | .72                                  | 60.47         | 238.87    | 214.29         |
| JUANI        | -RREME     | TU12  | TUB  | 7.73           | 16               |                              | .49                              | .72                                  | 41.59         | 214.29    | 201.43         |
| JUANI        | -COAPA     | TU19  | TUB  | 21             | 10               |                              | 9.000001E-02                     |                                      |               |           |                |
|              |            |       |      |                |                  |                              |                                  | .72                                  | 3.88          | 214.29    | 210.93         |
| RREME        | -VALLE     | TU13  | TUB  | .79            | 16               |                              | 1.57                             | .72                                  | 89.98001      | 201.43    | 195.19         |
| VALLE        | -18MAR     | TU14  | TUB  | 4.44           | 16               |                              | .65                              | .72                                  | 75.98001      | 195.19    | 167.73         |
| 18MAR        | -CAMAR     | TU15  | TUB  | 2.13           | 16               |                              | .95                              | .72                                  | 28.98         | 167.73    | 165.57         |
| CAMAR        | -ANAT8     | TU16  | TUB  | 2.29           | 16               |                              | .91                              | .72                                  | 19.98         | 165.57    | 164.44         |
| ANAT8        | -ANABO     | TU17  | TUB  | 2              | 16               |                              | .98                              | .72                                  | 10.98         | 164.44    | 164.14         |
| ANABO        | -SPINO     | TU18  | TUB  | 8.2            | 16               |                              | .48                              | .72                                  | -1.02         | 164.14    | 164.15         |
| SPINO        | -COAPA     | TU19  | TUB  | 24.1           | 10               |                              | .08                              | .72                                  | -13.02        | 164.15    | 210.93         |

CUANDO EL GASTO ES NEGATIVO INDICA EL GASTO DE J HACIA I

\*\*\*\*\* SE EMPLEO LA ECUACION DE \*\*\*\*\*

PANHANDLE .B  
NO EXISTE CORRECCION POR ELEVACION  
LA EFICIENCIA DE LA LINEA= .72

GASTOS CALCULADOS POR NODO (LOS QUE NO FUJERON DATOS)

| NODO  | GASTO<br>MPCD |
|-------|---------------|
| CARPI | -224          |

TABLA. 2

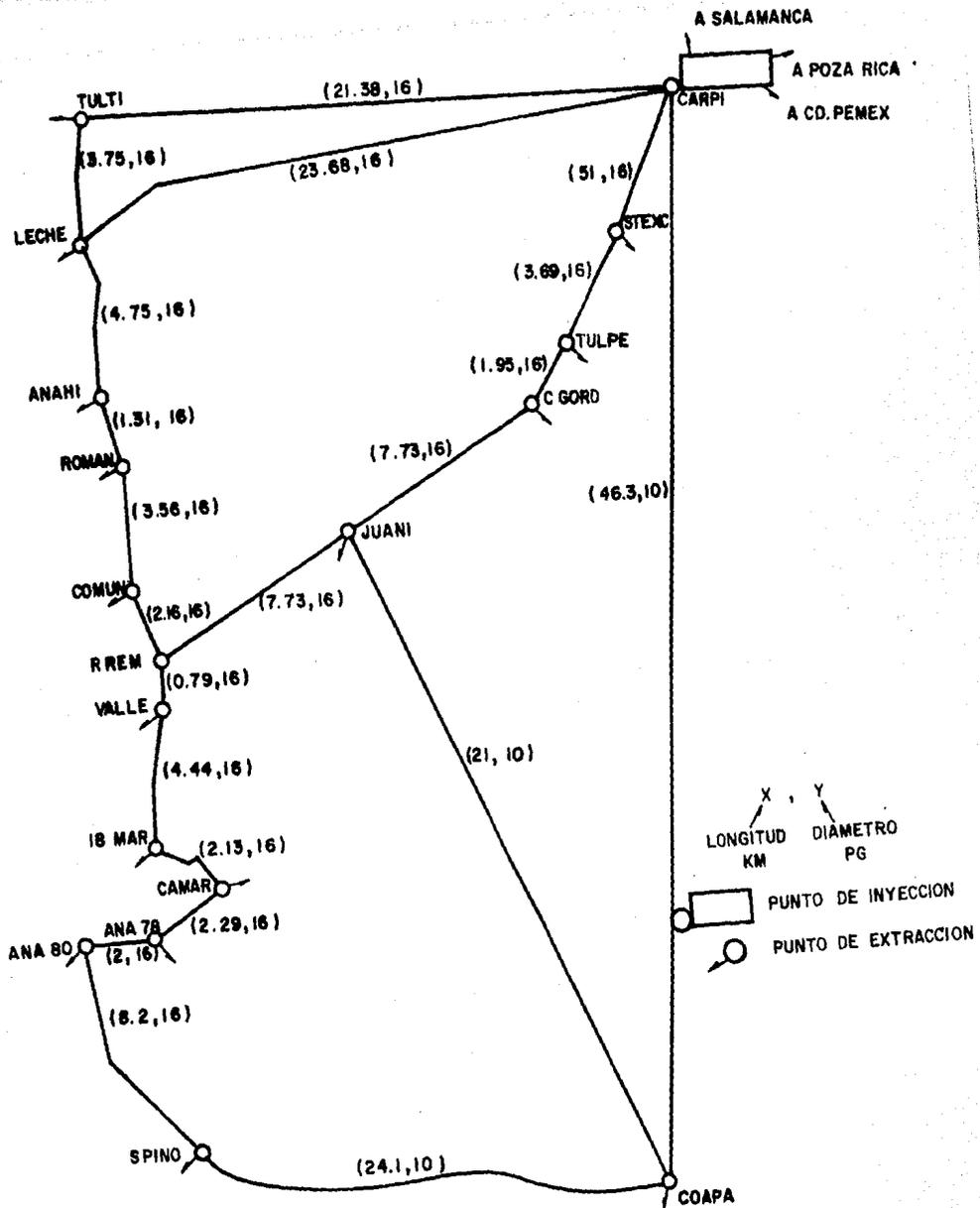


FIG. III. 6

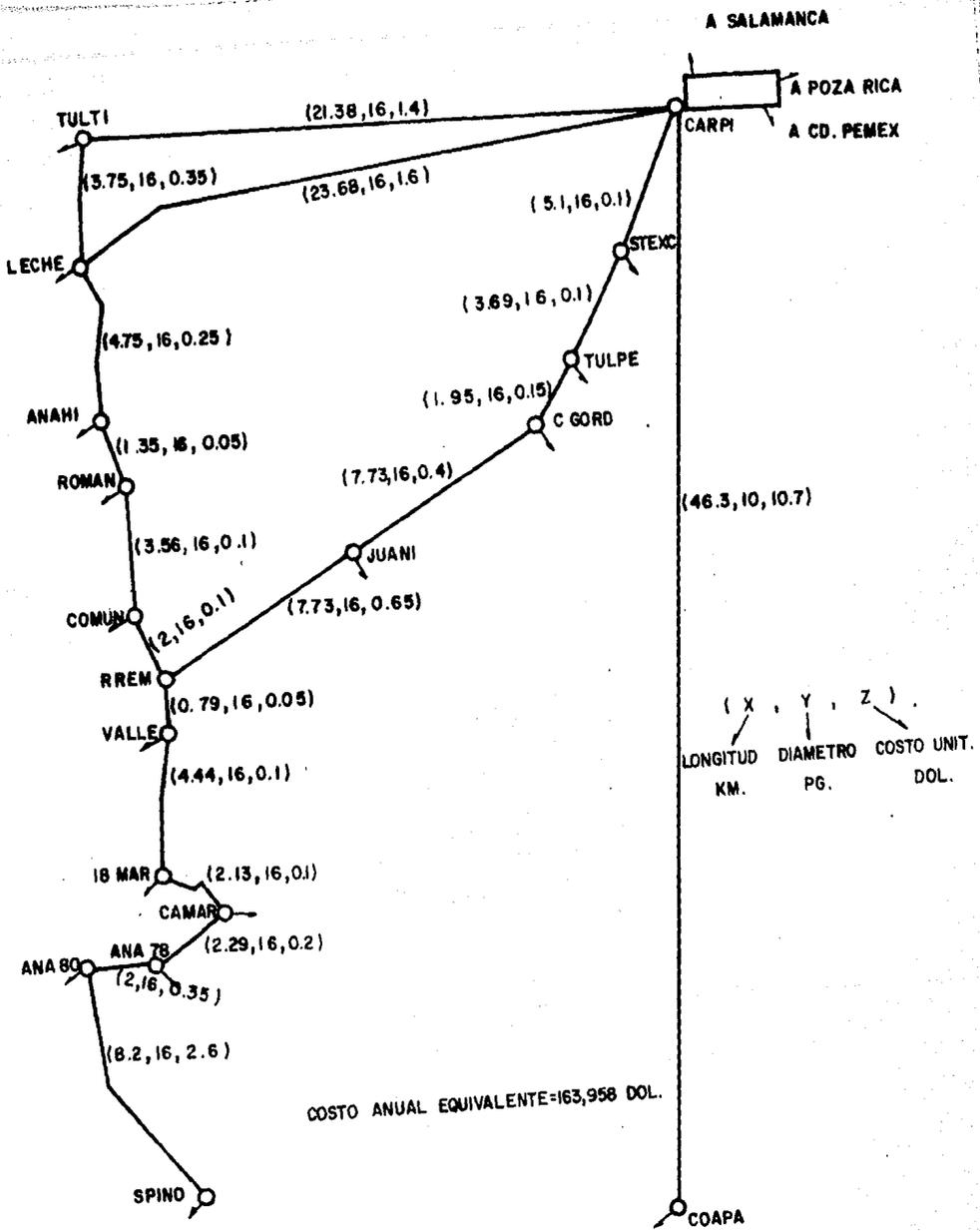


FIG. III. 7

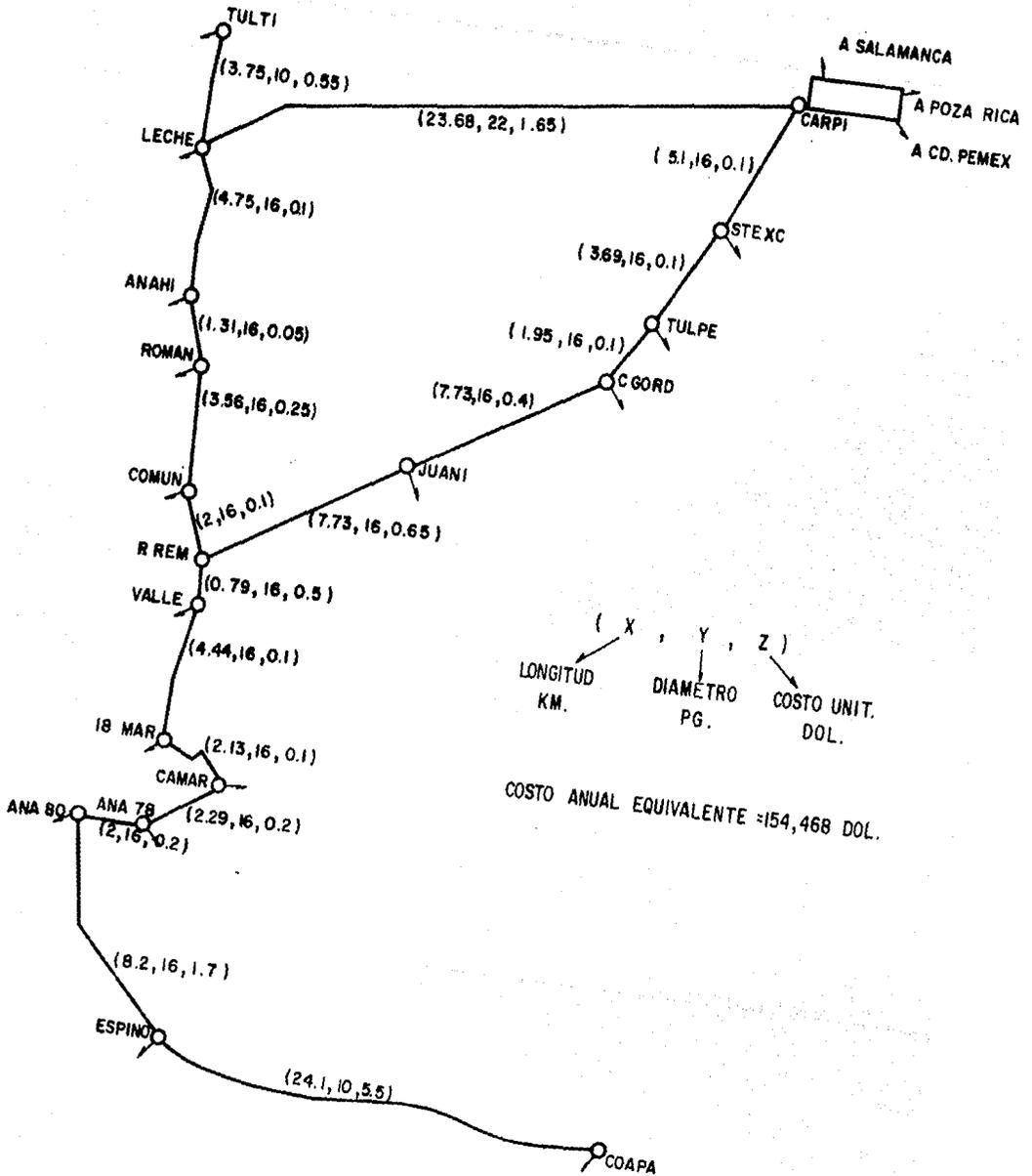


FIG. III. 8

RESULTADO CORRIDA No. 1  
SE ALCANZO CONVERGENCIA EN 9 ITERACIONES

| NODOS   |        | IDENT | TIPO | TUBERIA        |                  | COMPRESORA<br>POTENCIA<br>HP | COEFICIENTE<br>DE<br>TRANSMISION | FACTOR DE<br>CORRECCION<br>DEL CONEC | GASTO<br>MPCD | PRESIONES |        |
|---------|--------|-------|------|----------------|------------------|------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|---------------|-----------|--------|
| INICIAL | FINAL  |       |      | LONGITUD<br>KM | DIAMETRO<br>PULG |                              |                                  |                                      |               | ENTR.     | SAL.   |
| I       | J      |       |      |                |                  |                              |                                  |                                      |               |           |        |
| CARPI   | -LECHE | TUB2  | TUB  | 23.68          | 22               |                              | .62                              | .72                                  | 117.91        | 300       | 252.9  |
| LECHE   | -ANAHI | TUB4  | TUB  | 4.75           | 16               |                              | .63                              | .72                                  | 95.91001      | 252.9     | 216.88 |
| LECHE   | -TULTI | TUB3  | TUB  | 3.75           | 10               |                              | .22                              | .72                                  | 10            | 252.9     | 249.64 |
| ANAHI   | -ROMAN | TUB5  | TUB  | 1.31           | 16               |                              | 1.22                             | .72                                  | 79.91001      | 216.88    | 209.23 |
| ROMAN   | -COMUN | TUB6  | TUB  | 3.56           | 16               |                              | .73                              | .72                                  | 66.91001      | 209.23    | 193.73 |
| COMUN   | -RREME | TUB7  | TUB  | 2              | 16               |                              | .98                              | .72                                  | 58.91         | 193.73    | 186.55 |
| CARPI   | -STEXC | TUB8  | TUB  | 5.1            | 16               |                              | .61                              | .72                                  | 106.09        | 300       | 260.52 |
| STEXC   | -TULPE | TUB9  | TUB  | 3.69           | 16               |                              | .72                              | .72                                  | 82.09         | 260.52    | 241.2  |
| TULPE   | -CGORD | TU10  | TUB  | 1.95           | 16               |                              | .99                              | .72                                  | 77.09         | 241.2     | 231.63 |
| CGORD   | -JUANI | TU11  | TUB  | 7.73           | 16               |                              | .49                              | .72                                  | 65.09         | 231.63    | 201.95 |
| JUANI   | -RREME | TU12  | TUB  | 7.73           | 16               |                              | .49                              | .72                                  | 44.09         | 201.95    | 186.55 |
| JUANI   | -COAPA | TU19  | TUB  | 21             | 10               |                              | 9.000001E-02                     |                                      |               |           |        |
|         |        |       |      |                |                  |                              |                                  | .72                                  | 6             | 201.95    | 193.48 |
| RREME   | -VALLE | TU13  | TUB  | .79            | 16               |                              | 1.57                             | .72                                  | 103           | 186.55    | 177.71 |
| VALLE   | -18MAR | TU14  | TUB  | 4.44           | 16               |                              | .65                              | .72                                  | 89            | 177.71    | 134.47 |
| 18MAR   | -CAMAR | TU15  | TUB  | 2.13           | 16               |                              | .95                              | .72                                  | 42            | 134.47    | 128.89 |
| CAMAR   | -ANA7B | TU16  | TUB  | 2.29           | 16               |                              | .91                              | .72                                  | 33            | 128.89    | 125.02 |
| ANA7B   | -ANABO | TU17  | TUB  | 2              | 16               |                              | .98                              | .72                                  | 24            | 125.02    | 123.17 |
| ANABO   | -SPIND | TU18  | TUB  | 8.2            | 16               |                              | .48                              | .72                                  | 12            | 123.17    | 121.2  |

CUANDO EL GASTO ES NEGATIVO INDICA EL GASTO DE J HACIA I

\*\*\*\*\* SE EMPLEO LA ECUACION DE \*\*\*\*\*

PANHANDLE .B

NO EXISTE CORRECCION POR ELEVACION

LA EFICIENCIA DE LA LINEA= .72

GASTOS CALCULADOS POR NODO (LOS QUE NO FUERON DATOS)

| NODO  | GASTO |
|-------|-------|
|       | MPCD  |
| CARPI | -224  |

TABLA. 3

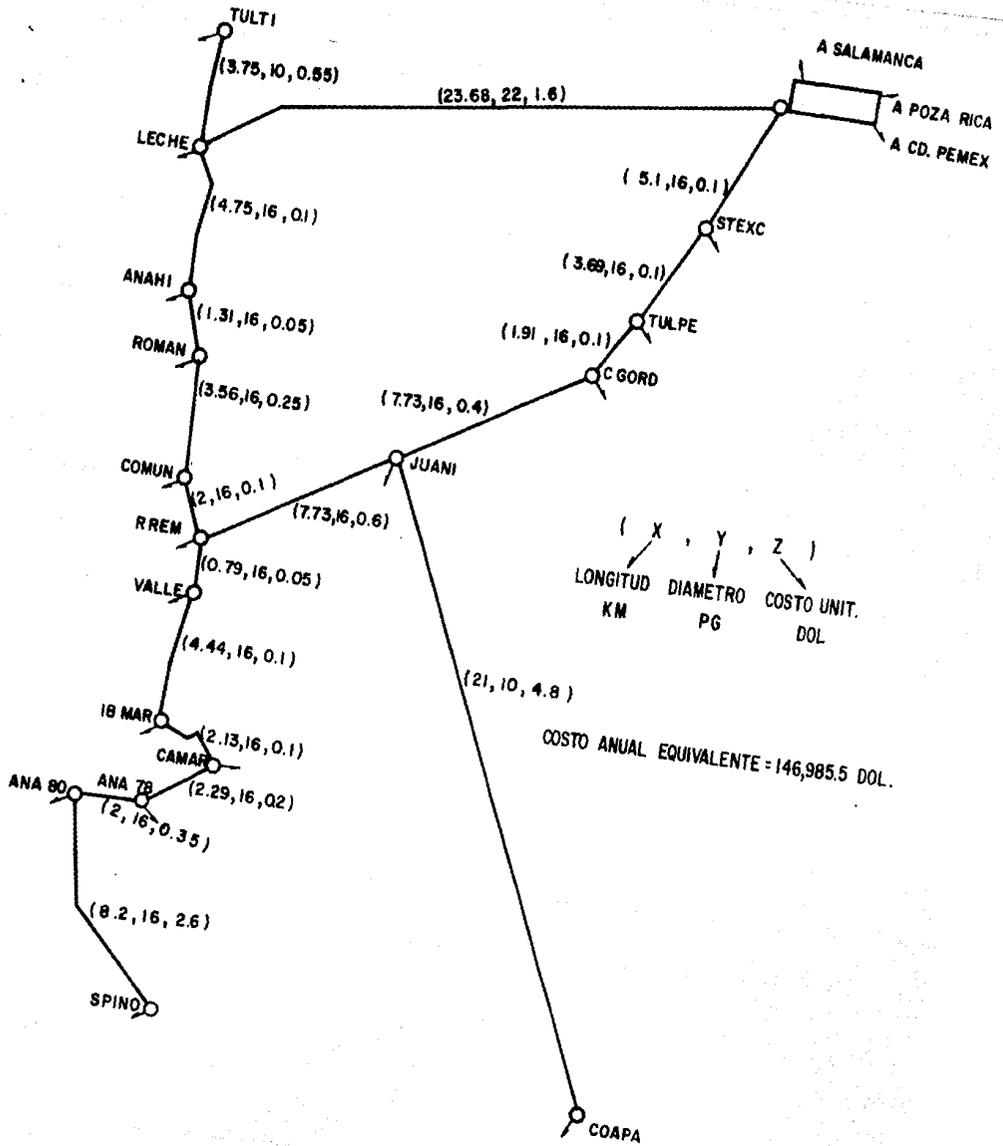


FIG. III. 9

\*\*\*\*\* DISTRIBUCION DEL SISTEMA PARA SU OPTIMIZACION ECONOMICA \*\*\*\*\*

| N O D O S |       | IDENT | T U B E R I A      |                  | COMPRESORA<br>POTENCIA<br>HP | TIPO | CAPACIDAD<br>CONECTOR<br>MMPCD | COSTO DE<br>TRANSF. ANUAL<br>DOL./MMPC |
|-----------|-------|-------|--------------------|------------------|------------------------------|------|--------------------------------|----------------------------------------|
| INICIAL   | FINAL |       | LONGITUD<br>MILLAS | DIAMETRO<br>PULG |                              |      |                                |                                        |
| CARPI-    | LECHE | TUB2  | 14.72              | 22               |                              | TUB  | 118                            | 1.6                                    |
| LECHE-    | ANAH1 | TUB4  | 2.95               | 16               |                              | TUB  | 96                             | .1                                     |
| LECHE-    | TULTI | TUB3  | 2.33               | 10               |                              | TUB  | 10                             | .55                                    |
| ANAH1-    | ROMAN | TUB5  | .81                | 16               |                              | TUB  | 80                             | .05                                    |
| ROMAN-    | COMUN | TUB6  | 2.21               | 16               |                              | TUB  | 67                             | .25                                    |
| COMUN-    | RREME | TUB7  | 1.24               | 16               |                              | TUB  | 59                             | .1                                     |
| CARPI-    | STEXC | TUB8  | 3.17               | 16               |                              | TUB  | 106                            | .1                                     |
| STEXC-    | TULPE | TUB9  | 2.29               | 16               |                              | TUB  | 82                             | .1                                     |
| TULPE-    | CGORD | TU10  | 1.21               | 16               |                              | TUB  | 77                             | .1                                     |
| CGORD-    | JUANI | TU11  | 4.8                | 16               |                              | TUB  | 65                             | .4                                     |
| JUANI-    | RREME | TU12  | 4.81               | 16               |                              | TUB  | 44                             | .6                                     |
| JUANI-    | COAPA | TU19  | 13.05              | 10               |                              | TUB  | 6                              | 4.8                                    |
| RREME-    | VALLE | TU13  | .49                | 16               |                              | TUB  | 103                            | .05                                    |
| VALLE-    | 18MAR | TU14  | 2.76               | 16               |                              | TUB  | 89                             | .1                                     |
| 18MAR-    | CAMAR | TU15  | 1.32               | 16               |                              | TUB  | 42                             | .1                                     |
| CAMAR-    | ANA7B | TU16  | 1.42               | 16               |                              | TUB  | 33                             | .2                                     |
| ANA7B-    | ANABO | TU17  | 1.24               | 16               |                              | TUB  | 24                             | .35                                    |
| ANABO-    | SPIND | TU18  | 5.1                | 16               |                              | TUB  | 12                             | 2.6                                    |
| TULTI-    | SALE  | IMAG  |                    |                  |                              |      | INFINITA                       | CERO                                   |
| LECHE-    | SALE  | IMAG  |                    |                  |                              |      | INFINITA                       | CERO                                   |
| ANAH1-    | SALE  | IMAG  |                    |                  |                              |      | INFINITA                       | CERO                                   |
| ROMAN-    | SALE  | IMAG  |                    |                  |                              |      | INFINITA                       | CERO                                   |
| COMUN-    | SALE  | IMAG  |                    |                  |                              |      | INFINITA                       | CERO                                   |
| STEXC-    | SALE  | IMAG  |                    |                  |                              |      | INFINITA                       | CERO                                   |
| TULPE-    | SALE  | IMAG  |                    |                  |                              |      | INFINITA                       | CERO                                   |
| CGORD-    | SALE  | IMAG  |                    |                  |                              |      | INFINITA                       | CERO                                   |
| JUANI-    | SALE  | IMAG  |                    |                  |                              |      | INFINITA                       | CERO                                   |
| VALLE-    | SALE  | IMAG  |                    |                  |                              |      | INFINITA                       | CERO                                   |
| 18MAR-    | SALE  | IMAG  |                    |                  |                              |      | INFINITA                       | CERO                                   |
| CAMAR-    | SALE  | IMAG  |                    |                  |                              |      | INFINITA                       | CERO                                   |
| ANA7B-    | SALE  | IMAG  |                    |                  |                              |      | INFINITA                       | CERO                                   |
| ANABO-    | SALE  | IMAG  |                    |                  |                              |      | INFINITA                       | CERO                                   |
| SPIND-    | SALE  | IMAG  |                    |                  |                              |      | INFINITA                       | CERO                                   |
| COAPA-    | SALE  | IMAG  |                    |                  |                              |      | INFINITA                       | CERO                                   |

TABLA. 4

CADENA DE FLUJO No. 1  
FORMADA POR LOS CONECTORES

| N O D O S    | IDENT. | TIPO |                              |             |
|--------------|--------|------|------------------------------|-------------|
| CARPI -STEXC | TUB8   | TUB  |                              |             |
| STEXC -SALE  | IMAG   | TUB  |                              |             |
|              |        |      | CON UN FLUJO DE 24 MMPCD     |             |
|              |        |      | Y UN COSTO UNITARIO TOTAL DE | .1 DOL/MMPC |

CADENA DE FLUJO No. 2  
FORMADA POR LOS CONECTORES

| N O D O S    | IDENT. | TIPO |                              |             |
|--------------|--------|------|------------------------------|-------------|
| CARPI -STEXC | TUB8   | TUB  |                              |             |
| STEXC -TULPE | TUB9   | TUB  |                              |             |
| TULPE -SALE  | IMAG   | TUB  |                              |             |
|              |        |      | CON UN FLUJO DE 5 MMPCD      |             |
|              |        |      | Y UN COSTO UNITARIO TOTAL DE | .2 DOL/MMPC |

CADENA DE FLUJO No. 3  
FORMADA POR LOS CONECTORES

| N O D O S    | IDENT. | TIPO |                              |             |
|--------------|--------|------|------------------------------|-------------|
| CARPI -STEXC | TUB8   | TUB  |                              |             |
| STEXC -TULPE | TUB9   | TUB  |                              |             |
| TULPE -CGORD | TU10   | TUB  |                              |             |
| CGORD -SALE  | IMAG   | TUB  |                              |             |
|              |        |      | CON UN FLUJO DE 12 MMPCD     |             |
|              |        |      | Y UN COSTO UNITARIO TOTAL DE | .3 DOL/MMPC |

CADENA DE FLUJO No. 4  
FORMADA POR LOS CONECTORES

| N O D O S    | IDENT. | TIPO |                              |             |
|--------------|--------|------|------------------------------|-------------|
| CARPI -STEXC | TUB8   | TUB  |                              |             |
| STEXC -TULPE | TUB9   | TUB  |                              |             |
| TULPE -CGORD | TU10   | TUB  |                              |             |
| CGORD -JUANI | TU11   | TUB  |                              |             |
| JUANI -SALE  | IMAG   | TUB  |                              |             |
|              |        |      | CON UN FLUJO DE 15 MMPCD     |             |
|              |        |      | Y UN COSTO UNITARIO TOTAL DE | .7 DOL/MMPC |

CADENA DE FLUJO No. 5  
FORMADA POR LOS CONECTORES

| N O D O S    | IDENT. | TIPO |                              |               |
|--------------|--------|------|------------------------------|---------------|
| CARPI -STEXC | TUB8   | TUB  |                              |               |
| STEXC -TULPE | TUB9   | TUB  |                              |               |
| TULPE -CGORD | TU10   | TUB  |                              |               |
| CGORD -JUANI | TU11   | TUB  |                              |               |
| JUANI -RREME | TU12   | TUB  |                              |               |
| RREME -VALLE | TU13   | TUB  |                              |               |
| VALLE -SALE  | IMAG   | TUB  |                              |               |
|              |        |      | CON UN FLUJO DE 14 MMPCD     |               |
|              |        |      | Y UN COSTO UNITARIO TOTAL DE | 1.35 DOL/MMPC |

CADENA DE FLUJO No. 6  
FORMADA POR LOS CONECTORES

| N O D O S    | IDENT. | TIPO |
|--------------|--------|------|
| CARPI -STEXC | TUB8   | TUB  |
| STEXC -TULPE | TUB9   | TUB  |
| TULPE -CGORD | TU10   | TUB  |
| CGORD -JUANI | TU11   | TUB  |
| JUANI -RREME | TU12   | TUB  |
| RREME -VALLE | TU13   | TUB  |
| VALLE -ISMAR | TU14   | TUB  |
| ISMAR -SALE  | IMAG   | TUB  |

CON UN FLUJO DE 30 MMPCD  
Y UN COSTO UNITARIO TOTAL DE 1.45 DOL/MMPC

CADENA DE FLUJO No. 7  
FORMADA POR LOS CONECTORES

| N O D O S    | IDENT. | TIPO |
|--------------|--------|------|
| CARPI -LECHE | TUB2   | TUB  |
| LECHE -SALE  | IMAG   | TUB  |

CON UN FLUJO DE 12 MMPCD  
Y UN COSTO UNITARIO TOTAL DE 1.6 DOL/MMPC

CADENA DE FLUJO No. 8  
FORMADA POR LOS CONECTORES

| N O D O S    | IDENT. | TIPO |
|--------------|--------|------|
| CARPI -LECHE | TUB2   | TUB  |
| LECHE -ANAH1 | TUB4   | TUB  |
| ANAH1 -SALE  | IMAG   | TUB  |

CON UN FLUJO DE 16 MMPCD  
Y UN COSTO UNITARIO TOTAL DE 1.7 DOL/MMPC

CADENA DE FLUJO No. 9  
FORMADA POR LOS CONECTORES

| N O D O S    | IDENT. | TIPO |
|--------------|--------|------|
| CARPI -LECHE | TUB2   | TUB  |
| LECHE -ANAH1 | TUB4   | TUB  |
| ANAH1 -ROMAN | TUB5   | TUB  |
| ROMAN -SALE  | IMAG   | TUB  |

CON UN FLUJO DE 13 MMPCD  
Y UN COSTO UNITARIO TOTAL DE 1.75 DOL/MMPC

CADENA DE FLUJO No. 10  
FORMADA POR LOS CONECTORES

| N O D O S    | IDENT. | TIPO |
|--------------|--------|------|
| CARPI -LECHE | TUB2   | TUB  |
| LECHE -ANAH1 | TUB4   | TUB  |
| ANAH1 -ROMAN | TUB5   | TUB  |
| ROMAN -COMUN | TUB6   | TUB  |
| COMUN -SALE  | IMAG   | TUB  |

CON UN FLUJO DE 8 MMPCD  
Y UN COSTO UNITARIO TOTAL DE 2 DOL/MMPC

CADENA DE FLUJO No. 11  
FORMADA POR LOS CONECTORES

| N O D O S    | IDENT. | TIPO |
|--------------|--------|------|
| CARPI -LECHE | TUB2   | TUB  |
| LECHE -TULTI | TUB3   | TUB  |
| TULTI -SALE  | IMAG   | TUB  |

CON UN FLUJO DE 10 MMPCD  
Y UN COSTO UNITARIO TOTAL DE 2.15

DOL/MMPC

CADENA DE FLUJO No. 12  
FORMADA POR LOS CONECTORES

| N O D O S    | IDENT. | TIPO |
|--------------|--------|------|
| CARPI -LECHE | TUB2   | TUB  |
| LECHE -ANAH1 | TUB4   | TUB  |
| ANAH1 -ROMAN | TUB5   | TUB  |
| ROMAN -COMUN | TUB6   | TUB  |
| COMUN -RREME | TUB7   | TUB  |
| RREME -VALLE | TU13   | TUB  |
| VALLE -IBMAR | TU14   | TUB  |
| IBMAR -SALE  | IMAG   | TUB  |

CON UN FLUJO DE 17 MMPCD  
Y UN COSTO UNITARIO TOTAL DE 2.25

DOL/MMPC

CADENA DE FLUJO No. 13  
FORMADA POR LOS CONECTORES

| N O D O S    | IDENT. | TIPO |
|--------------|--------|------|
| CARPI -LECHE | TUB2   | TUB  |
| LECHE -ANAH1 | TUB4   | TUB  |
| ANAH1 -ROMAN | TUB5   | TUB  |
| ROMAN -COMUN | TUB6   | TUB  |
| COMUN -RREME | TUB7   | TUB  |
| RREME -VALLE | TU13   | TUB  |
| VALLE -IBMAR | TU14   | TUB  |
| IBMAR -CAMAR | TU15   | TUB  |
| CAMAR -SALE  | IMAG   | TUB  |

CON UN FLUJO DE 9 MMPCD  
Y UN COSTO UNITARIO TOTAL DE 2.35

DOL/MMPC

CADENA DE FLUJO No. 14  
FORMADA POR LOS CONECTORES

| N O D O S    | IDENT. | TIPO |
|--------------|--------|------|
| CARPI -LECHE | TUB2   | TUB  |
| LECHE -ANAH1 | TUB4   | TUB  |
| ANAH1 -ROMAN | TUB5   | TUB  |
| ROMAN -COMUN | TUB6   | TUB  |
| COMUN -RREME | TUB7   | TUB  |
| RREME -VALLE | TU13   | TUB  |
| VALLE -IBMAR | TU14   | TUB  |
| IBMAR -CAMAR | TU15   | TUB  |
| CAMAR -ANA7B | TU16   | TUB  |
| ANA7B -SALE  | IMAG   | TUB  |

CON UN FLUJO DE 9 MMPCD  
Y UN COSTO UNITARIO TOTAL DE 2.55

DOL/MMPC

**CADENA DE FLUJO No. 15  
FORMADA POR LOS CONECTORES**

| N O D O S    | IDENT. | TIPO |
|--------------|--------|------|
| CARPI -LECHE | TUB2   | TUB  |
| LECHE -ANAH1 | TUB4   | TUB  |
| ANAH1 -ROMAN | TUB5   | TUB  |
| ROMAN -COMUN | TUB6   | TUB  |
| COMUN -RREME | TUB7   | TUB  |
| RREME -VALLE | TU13   | TUB  |
| VALLE -18MAR | TU14   | TUB  |
| 18MAR -CAMAR | TU15   | TUB  |
| CAMAR -ANA78 | TU16   | TUB  |
| ANA78 -ANABO | TU17   | TUB  |
| ANABO -SALE  | IMAB   | TUB  |

CON UN FLUJO DE 12 MMPCD  
Y UN COSTO UNITARIO TOTAL DE 2.9 DOL/MMPC

**CADENA DE FLUJO No. 16  
FORMADA POR LOS CONECTORES**

| N O D O S    | IDENT. | TIPO |
|--------------|--------|------|
| CARPI -STEXC | TUB8   | TUB  |
| STEXC -TULPE | TUB9   | TUB  |
| TULPE -CGORD | TU10   | TUB  |
| CGORD -JUANI | TU11   | TUB  |
| JUANI -CDAPA | TU19   | TUB  |
| CDAPA -SALE  | IMAG   | TUB  |

CON UN FLUJO DE 6 MMPCD  
Y UN COSTO UNITARIO TOTAL DE 5.5 DOL/MMPC

**CADENA DE FLUJO No. 17  
FORMADA POR LOS CONECTORES**

| N O D O S    | IDENT. | TIPO |
|--------------|--------|------|
| CARPI -LECHE | TUB2   | TUB  |
| LECHE -ANAH1 | TUB4   | TUB  |
| ANAH1 -ROMAN | TUB5   | TUB  |
| ROMAN -COMUN | TUB6   | TUB  |
| COMUN -RREME | TUB7   | TUB  |
| RREME -VALLE | TU13   | TUB  |
| VALLE -18MAR | TU14   | TUB  |
| 18MAR -CAMAR | TU15   | TUB  |
| CAMAR -ANA78 | TU16   | TUB  |
| ANA78 -ANABO | TU17   | TUB  |
| ANABO -SPIND | TU18   | TUB  |
| SPIND -SALE  | IMAG   | TUB  |

CON UN FLUJO DE 12 MMPCD  
Y UN COSTO UNITARIO TOTAL DE 5.5 DOL/MMPC

EL COSTO ANUAL EQUIVALENTE TOTAL PARA EL DISEÑO ES = 146985.5 DOL

#### IV.-CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Se presenta un modelo que permite, mediante un programa de cómputo, efectuar la evaluación económica de redes de tuberías que transportan gas. A su vez, realiza la ingeniería básica de diseño, y permite analizar la eficiencia con que están operando redes ya instaladas.

El programa fuente fué elaborado en lenguaje Básic, para ser utilizado en la IBM-PC y sistemas compatibles, con esto se disminuyen costos en computación, y es posible analizar un mayor número de opciones de diseño.

Al operar el programa en la parte correspondiente a el modelo de flujo, dado que la facilidad para fijar datos y establecer incógnitas es grande, se debe tener cuidado en la manera en la que se establezca lo anterior, ya que se puede estar obligando al programa a que calcule sistemas irreales. De este modo, si al usar el programa se encuentran errores, se deberan revisar datos e incógnitas y observar su lógica.

Se recomienda no seleccionar incógnitas en los conectores unidos al mismo nodo, porque de acuerdo a la construcción del sistema de ecuaciones se presenta dependencia lineal y esto no se puede resolver con el programa.

Para la selección del diseño óptimo es necesario realizar varias corridas con el programa completo. En la corrida inicial es conveniente considerar el máximo número de opciones (conectores) posibles; con base en la distribución que se obtenga del flujo y los costos, se podrán seleccionar o descartar conectores y considerar otras posibles alternativas.

Se recomienda como una primera etapa en el proceso de diseño correr sólo la parte correspondiente al modelo de flujo, éste nos indicará para las condiciones de operación establecidas en qué conectores no es conveniente manejar flujo, o ayudará a la selección de un arreglo inicial con el que puedan obtenerse las mismas. El número de corridas necesarias en esta etapa se estima no mayor de cuatro.

Como criterio de comparación y selección de la mejor alternativa se utiliza el costo anual equivalente; este método se recomienda en el análisis económico de alternativas.

Uno de los costos de mayor relevancia en el diseño de un sistema de transporte de gas, es el de compresión. Por medio del programa puede determinarse la ubicación adecuada de las compresoras, así como la potencia requerida en éstas, que da los costos mas económicos para las condiciones de operación establecidas.

El programa fué realizado con el fin de utilizarse en redes de gas seco, también es posible utilizarlo cuando el gas lleva consigo pequeñas cantidades de líquido.

La aplicación del modelo puede hacerse extensiva a redes de agua o aceite; para esto, sólo bastará hacer algunas modificaciones en la parte correspondiente al modelo de flujo.

Para la utilización del programa se requieren 256K de memoria en la computadora, recomendándose trabajarlo como programa objeto para aumentar la rapidéz en su ejecución; puede aplicarse a redes de hasta 100 nodos.

En el pasado, el Ingeniero encargado del diseño de redes de transporte de gas, estaba muy limitado en cuanto a la toma de decisiones sobre cual diseño seleccionar ante una variedad de opciones posibles. A su vez, no podía o le era muy difícil, analizar la eficiencia de operación de las redes que ya estaban en funcionamiento. Con el modelo que se presenta y con el incremento notable en las facilidades de computación, esto será en el futuro una tarea mucho más sencilla de realizar.

## NOMENCLATURA.

|                 |                                                                           |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------|
| A               | Conjunto de todos los conectores.                                         |
| AI              | Suma de Yo y Go                                                           |
| BI              | Suma de YM y GN                                                           |
| CAUE            | Costo anual uniforme equivalente de la tubería.                           |
| CAUEC           | Costo anual uniforme equivalente total correspondiente a las compresoras. |
| CAUET           | Costo anual uniforme equivalente total correspondiente a la tubería.      |
| CC              | Inversión inicial en compresoras.                                         |
| Cf              | Costo de cada 1000 pies cúbicos de gas.                                   |
| CLMS            | Costo de supervisión y lubricantes.                                       |
| COM             | Costo de combustible anual.                                               |
| Ct              | Inversión inicial en tubería.                                             |
| CUC             | Costo unitario de transporte correspondiente a las compresoras.           |
| CUt             | Costo unitario de transporte correspondiente a la tubería.                |
| D               | Diámetro interno de la tubería.                                           |
| D <sub>ij</sub> | Diámetro del conector ij.                                                 |
| EI              | Factor de diseño por tipo de unión longitudinal.                          |
| Fi              | Cantidad fija correspondiente a costos de operación y mantenimiento.      |
| Fl              | Factor de diseño por tipo de construcción.                                |

|                |                                                                                     |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| GN             | Pendiente de la recta que representa el costo variable de colocación de la tubería. |
| G <sub>0</sub> | Costo fijo en colocación de tubería.                                                |
| HP<br>ij       | Potencia en el conector ij.                                                         |
| I              | Conjunto de conectores en los cuales el flujo puede ser incrementado.               |
| i              | Tasa de interés sobre el capital para tuberías.                                     |
| L              | Longitud de la tubería.                                                             |
| m              | Vida útil de las compresoras.                                                       |
| N              | Conjunto de conectores que no pueden tener incremento o decremento en su flujo.     |
| n              | Vida útil de la tubería.                                                            |
| p              | Costo total en que una unidad puede incurrir por viajar de S a T.                   |
| P <sub>i</sub> | Presión en el nodo i.                                                               |
| P <sub>1</sub> | Presión máxima de operación.                                                        |
| Q <sub>i</sub> | Gasto que es adicionado o extraído en el nodo A.                                    |
| q<br>ij        | Gasto que es manejado en conector ij.                                               |
| Q <sub>t</sub> | Gasto total anual manejado en conector en el año t.                                 |
| R              | Conjunto de conectores en los cuales el flujo puede ser reducido.                   |
| r              | Tasa de interés sobre el capital para compresoras.                                  |
| S              | Nodo Fuente.                                                                        |
| SFET           | Producto de S <sub>1</sub> , F <sub>1</sub> , E <sub>1</sub> y T <sub>1</sub> .     |
| S <sub>1</sub> | Esfuerzo máximo permisible.                                                         |
| T              | Nodo Objetivo.                                                                      |
| T <sub>1</sub> | Factor de diseño por deformación térmica.                                           |

- X            Conjunto de todos los nodos.
- Xc           Costo inicial instalado de compresión.
- YM           Pendiente de la recta que representa el costo variable de la tubería no instalada.
- Yo           Costo fijo en tubería no instalada.
- (X,Y)        Conector con su parte inicial en el nodo X y parte terminal en el nodo Y.
- a(X,Y)       Costo unitario de envío a través del conector (X,Y).
- c(X,Y)       Capacidad del conector (X,Y).
- f(X,Y)       Número de unidades en que están fluyendo a través del conector (X,Y).
- i(X,Y)       Número de unidades en que puede incrementarse el flujo en el conector (X,Y).
- r(X,Y)       Numero de unidades en que puede reducirse el flujo en el conector (X,Y).

Subíndices:

- i            Relativo al nodo donde inicia el conector.
- j            Relativo al nodo donde termina el conector.

## REFERENCIAS

- 1.-Asme "*Gas Transmission and Distribution Piping Systems*", USAS B31.8-1968.
- 2.-Broyden, C.G. "*A Class of Methods for Solving Nonlinear Simultaneous Equations*", Mathematics Computation, 1972.
- 3.-Campbell, J.M. "*Gas Conditioning and Processing*", John M. Campbell, E.U., 1970.
- 4.-Chang, A. "*Application of Sparse Matrix Methods in Electric Power System Analysis*", Proceedings of Sparse Matrix Symposium, New York, 1968, pp. 113-122.
- 5.-Chavez, A. "*Costos Unitarios de Producción de Crudo y Gas*", Subdirección de Producción Primaria, Gerencia de Planeación, PEMEX, 1984.
- 6.-Conte, S.D. y Boar, C. "*Análisis numérico elemental*", McGraw Hill, E.U., 1974.
- 7.-Flanigan, D. "*Constrained Derivatives in natural Gas Pipeline System Optimization*", JPT, mayo, 1972, pp. 549-556.
- 8.-Ford, L.R. y Fulkerson, D.R. "*Flows in Networks*", Princeton

- Press, Princeton, 1962.
- 9.-Graham, G.E., Maxwell, D.A. y Vallone, A. "How to Optimize Gas Pipeline Networks", Pipeline Industry, Junio, 1971.
  - 10.-Henry, E. M. y Norman, J.M. "Optimization of the Design and Operation of Natural Gas Pipeline Systems", SPE, no. 4006, octubre, 1972.
  - 11.-Limón, H.T. "Transporte de Gas en Régimen Permanente", Instituto Mexicano del Petróleo, publicación no. 74bh/164, julio 1974.
  - 12.-Mejía, V.R. "Cálculo de Potencia de Compresoras y Diámetros de Tuberías de Sistemas que Transportan Gas", Tesis, UNAM. 1982.
  - 13.-Minieka, E. T. "Optimization algorithms for networks and graphs" Marcel Dekker Inc., E.U., 1978.
  - 14.-Newman, D.G. "Engineering Economic Analysis", McGraw Hill Inc., E.U., 1983.
  - 15.-Nippon Steel Corporation "Nippon Steel line Pipe", Nissho-Jwa: Mexicana, S.A., octubre, 1975.
  - 16.-Office of Emergency Preparedness of U.S.A. "Design of Economical Offshore Natural Gas Pipeline Systems", Report R-1 prepared for FPC, noviembre, 1968.

- 17.-Ruiz Montalvo,R. *"Proyecto de una red de tuberías para el transporte de gas del distrito Noreste"*, Pemex, Gerencia de Explotación, Departamento de Ingeniería de Yacimientos, Mexico,D.F. 1953.
- 18.-Sanchez,A.F. *Transporte de Gas en Régimen Variable"*, Instituto Mexicano del Petróleo, División Producción.
- 19.-Sanchez,A.F., Mejía,V.R. y Martínez,G.J.L *"Estudio de factibilidad de centralización de las estaciones de compresión y separación de gas en el distrito Poza Rica"*,Instituto Mexicano del Petróleo, División de Producción.
- 20.-Sanchez,A.F.,Pazmiño,V.J. y Arredondo,G.S. *"Estudio del diseño de la red de distribución de gas en la cd. de Toluca y Zonas Aledañas"*, Instituto Mexicano del Petróleo, División de Producción,Abril,1979.
- 21.-Solorzano Zenteno,L.N. *"Diseño Económico de Líneas de Conducción de Gas Natural"*, Ponencia dictada en el Congreso Panamericano de Ingeniería del Petróleo, 1979.
- 22.-Stoner,M.A. *"A new way to design natural gas systems"*, Pipe Line Industry, febrero 1970, pp.38-42.
- 23.-Stoner,M.A. *"Sensitivity analysis applied to a steady-state model of natural gas transportation system"*,SPE Journal,abril 1972,pp. 115-125.

24.-Thinney,W.F. y Walker,J.W. *Direct Solutions of sparse network equations by optimally ordered triangular factorizacion*", Proceeding of the IEEE,vol.55(11), noviembre, 1967, pp.1801-1809.

25.-Varios Autores "*Handbook of Natural Gas Engineering*", Mc Graw Hill Book Company,Inc.,E.U.,1959.

26.-Westman,D.A., Hellums,L.J.,Everett,D.P. y Foster,J.R. "*Phillips Devises Computer Program to Design Gas-Gathering Systems*",Oil and Gas,J. ,febrero, 1969.

27.-Wilde D.J. y Beightler, C.S. "*Foundations of Optimization*", Prentice-Hall,Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1967.

## APENDICE A

### *Definición de Algunos Conceptos Utilizados*

**NODO.**—Representa puntos donde uno o mas conectores terminan o donde se adiciona o se extrae flujo del sistema.

**CONECTOR.**—Son los elementos a través de los cuales hay intercambio de masa de un nodo a otro.

**GRAFICA.**—Esta formada tanto por un conjunto de numeros  $X$  llamados nodos y un conjunto  $A$  de pares ordenados de nodos; los elementos de  $A$  son llamados conectores y la gráfica es denotada por  $(X,A)$ .

**RED.**—Es una Gráfica con uno o mas números asociados a cada uno de sus conectores.

**LOOP.**—Es un conector que tiene su parte inicial o salida y su parte terminal o llegada unida a el mismo nodo.

**CADENA.**—Es una secuencia de conectores  $a_1, a_2, \dots, a_n, \dots, a_{n+1}$ , y una secuencia de nodos  $x_1, x_2, \dots, x_n, \dots, x_{n+1}$ , tal que los puntos terminales de el conector  $a_i$  son los nodos  $x_i$  y  $x_{i+1}$  para  $i=1, 2, \dots, n$ ; así puede ser que  $a_i=(x_i, x_{i+1})$  o  $a_i=(x_{i+1}, x_i)$ . El nodo  $x_1$ , es llamado el nodo inicial de la gráfica y el nodo  $x_{n+1}$  es llamado el punto final. La longitud de una cadena es igual al número de conectores que la forman.

**CICLO.**—Es una cadena cuyo nodo inicial y nodo final es el mismo.

**CORTE.**—Es un conjunto de conectores que al ser desprendidos de la grafica, ésta es desconectada en dos componentes.

## APENDICE B

### *Ecuaciones de flujo*

Una vez que han sido determinadas las ecuaciones de balance, ecuaciones (11), es necesario substituir la ecuacion adecuada que relacione el gasto  $q_{ij}$  con la presión del fluido en sus extremos (nodos  $i, j$ ). En el caso de tuberías se cuenta con ecuaciones como la de Weymouth, Panhandle A, Panhandle B, cuyo uso se recomienda para ciertas condiciones de la tubería y ciertas características del gas que se va a manejar.

En general, todas estas ecuaciones pueden ser reducidas algebraicamente a la forma siguiente:

$$q_{ij} = C_{ij} \left[ \frac{P_i^2 - P_j^2}{Z_i - Z_j} \right]^{0.5} \dots \dots \dots (B-1)$$

En donde,  $C_{ij}$  es el coeficiente de transmisión de la tubería, el cual, es función de la longitud y diámetro de ésta, densidad del gas, temperatura media de flujo,

condiciones base y eficiencia de flujo;  $P_i$ ,  $P_j$ , son las presiones del fluido en los nodos  $i$ ,  $j$  respectivamente.  $Z$  es el factor de compresibilidad de el gas y  $n$  es un exponente que depende de la ecuación que se utilice.

Para las compresoras, las ecuaciones pueden reducirse a la forma siguiente.

$$q_{ij} = \frac{HP}{K_1 \left[ \begin{array}{c} P_i \\ - \\ P_j \end{array} \right]^{K_2}} - K_3 \quad \dots \dots \dots (B-2)$$

En donde, HP es la potencia de la compresora y  $K_1$ ,  $K_2$ , y  $K_3$  son constantes que dependen del tipo de compresora y de las características del gas.

## APENDICE C

### *Método de Newton-Raphson para N Dimensiones*

A continuación se presenta brevemente la aplicación del método de Newton Raphson a un problema de N dimensiones.

Considere un sistema de N ecuaciones no lineales de la forma  $F_i(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0$ ; para  $i=1, 2, \dots, n$ ; con incógnitas  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . El valor de la incógnita al nivel de la iteración  $k+1$ , esta dado por:

$$X_i^{k+1} = X_i^k + \Delta X_i^{k+1} \dots \dots \dots i \in X \dots \dots (C-1)$$

En donde el vector de correcciones  $\Delta X_i^{k+1}$  se obtiene mediante la solución del sistema de ecuaciones lineales siguientes:

$$\frac{dF_i}{dX_j^k} \Delta X_j^{k+1} = -F_i(X_1^k, X_2^k, \dots, X_n^k) \quad i=1, 2, \dots, n \dots (C-2)$$

El sistema puede expresarse en forma matricial como:

$$\begin{bmatrix}
 \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial x_n} \\
 \frac{\partial F_2}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial F_2}{\partial x_n} \\
 \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\
 \frac{\partial F_n}{\partial x_1} & \frac{\partial F_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial F_n}{\partial x_n}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 x_1 \\
 x_2 \\
 \vdots \\
 x_n
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 -F_1 \\
 -F_2 \\
 \vdots \\
 -F_n
 \end{bmatrix}
 \quad \dots (C-3)$$

El cual puede resolverse fácilmente usando el método de  
 (5)  
 eliminación de Gauss.

Las derivadas parciales para los conectores (tuberías y  
 compresoras) están dadas por las expresiones siguientes:

$$\frac{\partial F_i}{\partial P_j} = \sum_{j/(i,j) \in M} \frac{\partial F_j}{\partial P_i} \quad \dots (C-4)$$

$$\frac{\partial F_i}{\partial Q_i} = 1 \quad \dots (C-5)$$

$$\frac{\partial F_i}{\partial Q_j} = 0 \quad \dots (C-6)$$

Para tuberías:

$$\frac{dF_i}{dP_j} = -2n C_{ij} P_i^2 \begin{bmatrix} P_i^2 & P_j^2 \\ Z_i & Z_j \end{bmatrix} \dots \dots \dots (C-7)$$

$$\frac{dF_i}{dD_{ij}} = S_{ij} m C_{ij} d_{ij}^{m-1} \begin{bmatrix} P_i^2 & P_j^2 \\ Z_i & Z_j \end{bmatrix} \dots \dots \dots (C-8)$$

De donde  $C_{ij}$  es una constante para cada tubería que multiplicada por  $d_{ij}^m$  nos da el coeficiente de transmisión de la misma;  $m$  es un exponente que depende la ecuación que se esté aplicando.

Para compresoras:

$$\frac{dF_i}{dP_j} = \frac{K_2 \left( \frac{P_i}{P_j} \right)^{K_2} \frac{1}{P_j}}{K_1 \left[ \left( \frac{P_i}{P_j} \right)^{K_2} - K_3 \right]^2} \dots \dots \dots (C-9)$$

$$\frac{dF_i}{dHP_{ij}} = \frac{1}{\left[ K_1 \left( \frac{P_i}{P_j} \right)^{K_2} - K_3 \right]} \dots \dots \dots (C-10)$$

Se observa 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 de ecuaciones lineales.