

18  
2-9.

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



## CALCULO DE POTENCIA DE COMPRESORAS Y DIAMETROS DE TUBERIAS DE SISTEMAS QUE TRANSPORTAN GAS

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO PETROLERO  
PRESENTA  
RUBEN MEJIA VELASCO  
MEXICO, D. F. 1982



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## I N D I C E

	Pág.
Resumen	1
I. Introducción	2
II. Teoría	4
II.1.- Método de Stoner	4
II.2.- Método de Newton-Raphson	8
II.3.- Solución de Matrices Ralas	13
III. Programa de Cómputo	22
III.1.- Programa de Cómputo Original	22
III.2.- Modificaciones al Programa de Cómputo	25
IV. Aplicación	28
V. Conclusiones y Recomendaciones	33
Referencias	35

## R E S U M E N

Este trabajo presenta una modificación del programa FLUPER del Instituto Mexicano del Petróleo, el cual simula el transporte de gas en régimen permanente, a través de sistemas de redes de recolección o distribución. La modificación consiste en poder calcular directamente los diámetros de las tuberías y las potencias de las compresoras requeridos en un diseño de una red de recolección o de distribución de gas natural.

Por medio de esta modificación es posible realizar diseños de redes utilizando menor tiempo de computación y menos horas-hombre. Por lo cual un diseño se obtiene en menos tiempo y a menor costo.

Además se presenta un ejemplo hipotético del diseño de una red de distribución de gas, el cual es calculado con el programa anterior y con el programa modificado. Se hace una comparación de costos y tiempo de cómputo con uno y otro programa.

## I N T R O D U C C I O N

En el diseño o modificación de un sistema de recolección o distribución de gas, se pretende que el sistema pueda tener capacidad para satisfacer las necesidades de gas presentes y futuras, manteniendo la presión del gas bajo los límites de seguridad de la resistencia de las tuberías.

Debido a que los elementos que constituyen los sistemas de distribución o recolección de gas, tales como: tuberías, compresoras, válvulas, etc., tiene grandes costos de inversión y de mantenimiento, es conveniente invertir en un buen diseño del sistema, para disminuir estos costos un porcentaje considerable.

De los métodos presentes, hasta el momento, para el análisis de sistemas que manejan gas en régimen permanente, el método más general y usado es el propuesto por M.A. Stoner<sup>(1) (2)\*</sup>, el método fue programado por el Dr. Tomás Limón Hernández<sup>(3)</sup>, en lenguaje FORTRAN, para su uso en computadoras electrónicas. El programa, llamado FLUPER, se utiliza actualmente en el Instituto Mexicano del Petróleo en el análisis y diseño de redes de recolección y distribución de gas.<sup>(4)(5)</sup>

Durante el uso del programa en dichos análisis y diseños, se observó la conveniencia de modificar este programa para poder calcular de manera directa diámetros de tubería o potencia de las compresoras, pues con el programa actual, se suponen varios diámetros y potencias para los diseños o ampliaciones de

\* Referencias al final.

sistemas de gas, y con los resultados se observa cuál sistema es el que da las mejores condiciones de operación.

Con el programa propuesto en este trabajo, estas condiciones - de operación se fijan y se obtienen los diámetros y las potencias necesarias - en el sistema que permitan satisfacer dichas condiciones.

## TEORIA

### 1. Método de Stoner<sup>(1),(2)</sup>

Los sistemas de recolección o distribución de gas natural están compuestos de varios elementos, como son: tuberías, compresoras, válvulas, etc.

Para la formulación de un modelo matemático que represente el comportamiento de un sistema de gas, es necesario establecer las ecuaciones que contengan los diferentes parámetros de cada uno de estos elementos, de forma tal que describan rigurosamente los efectos de interacción entre ellos.

En la Fig. 1 se muestra un ejemplo de un sistema de recolección de gas, este sistema para representarlo por medio de un modelo matemático, puede ser descrito en términos de "nodos" y "conectores de nodos", como se muestra en la Fig. 2. En donde los nodos representan físicamente puntos en donde se extrae o adiciona gas al sistema, o los extremos de los conectores y los conectores representan los elementos del sistema en sí. Al conjunto de conectores se le denominará con  $M$  y al de nodos con  $N$ .

Un sistema con flujo de gas en régimen permanente, debe satisfacer la ley de la conservación de la masa en cada uno de sus nodos, la cual 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 proporciona o extrae del sistema a través de ese nodo, debe ser cero. La ecuación que representa esto, es la siguiente:

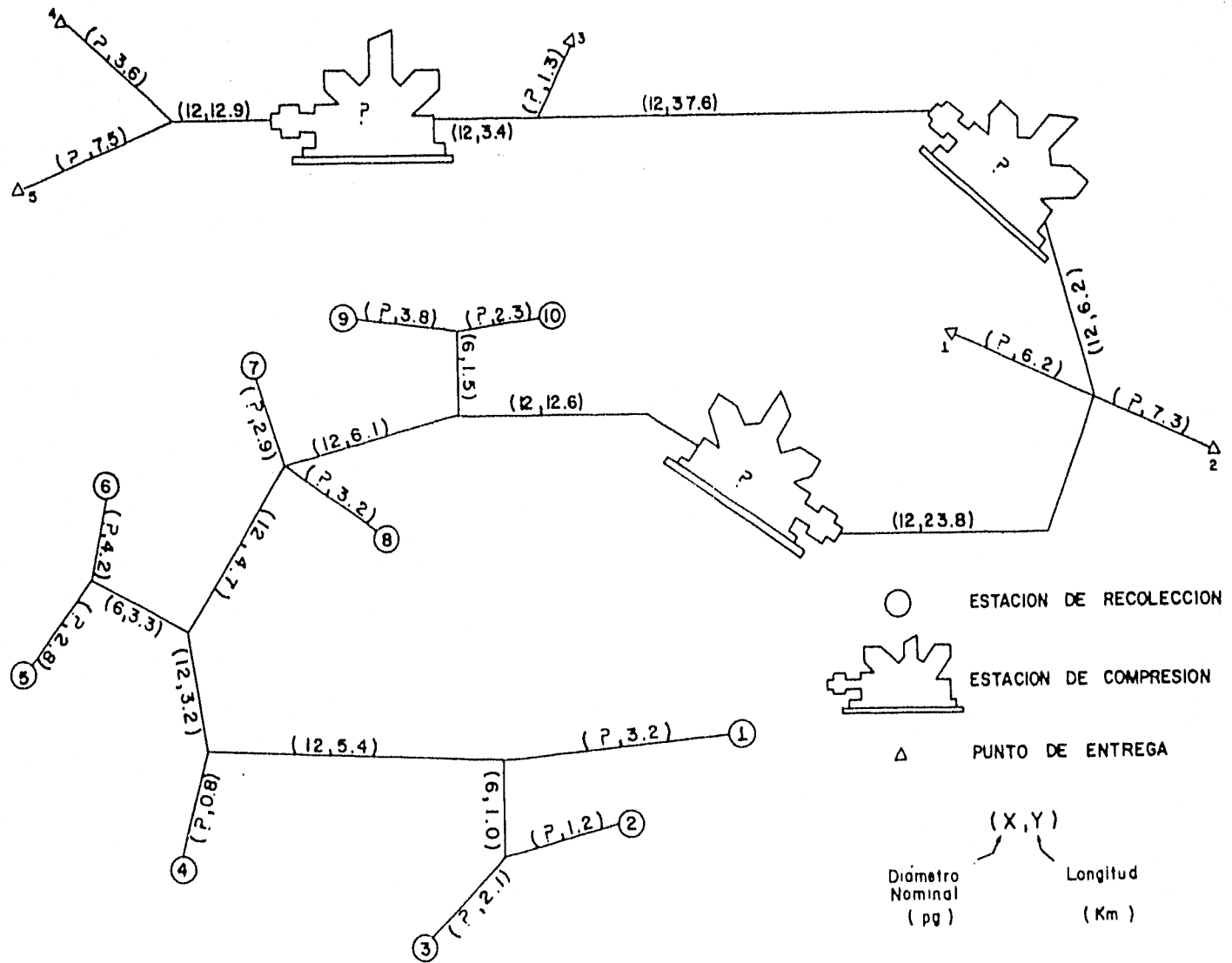


Fig.1.- Ejemplo de un Sistema de Recolección y Distribución de Gas



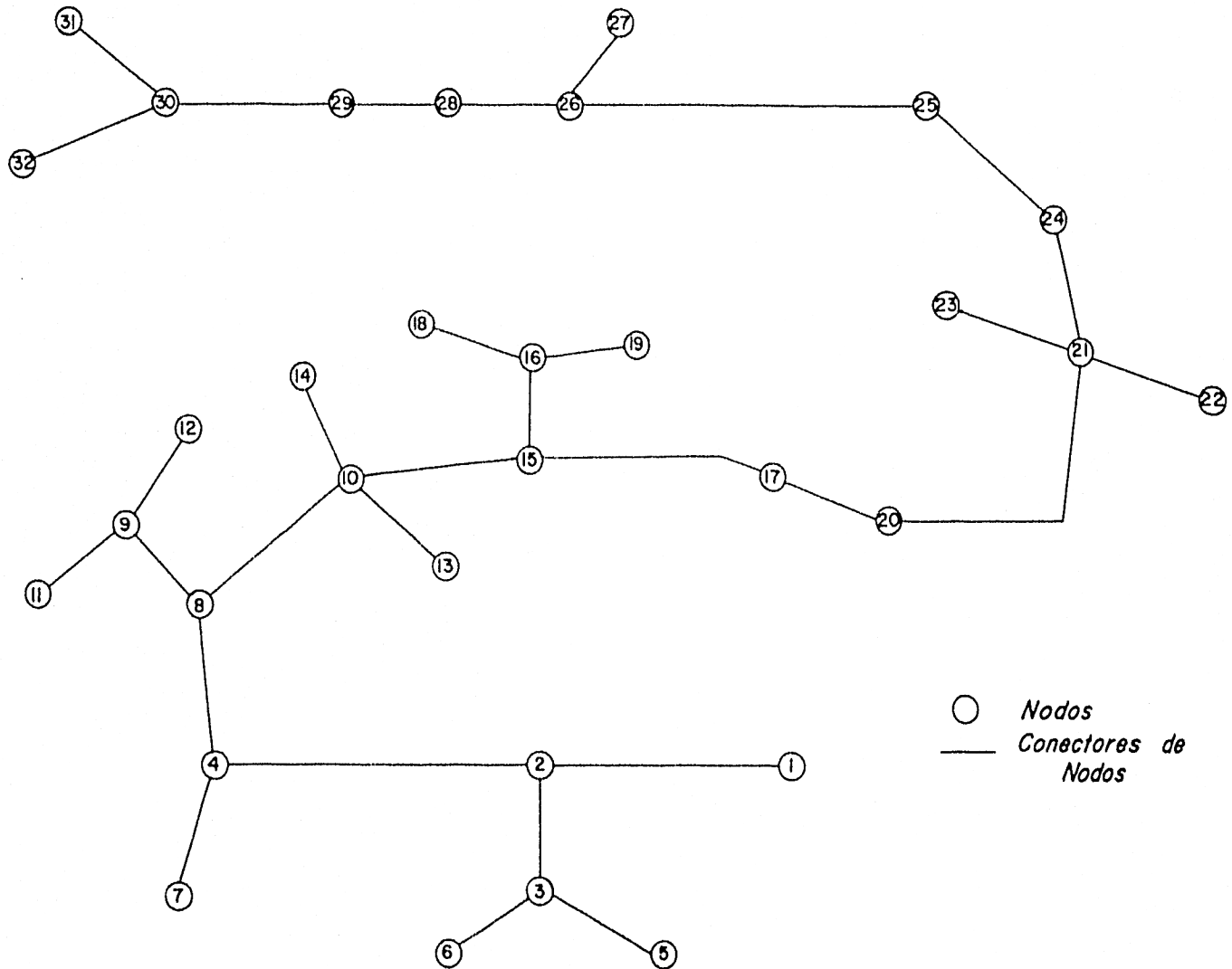


Fig. 2.- Diagrama representativo de un Sistema de Recolección de Gas, por medio de nodos y conectores de nodos

$$F_i = \sum_{j/(i,j) \in M} S_{ij} q_{ij} + Q_i = 0 \quad i \in N \quad (1)$$

en donde:  $S_{ij}$  es una variable que indica el sentido del flujo (\*) y la notación  $j/(i,j) \in M$ , representa a todos los conectores relacionados con el nodo  $i$ . A estas ecuaciones se les conoce como ecuaciones de balance en los nodos y describen convenientemente la interacción de los elementos del sistema.

Para los conectores existen diferentes ecuaciones que relacionan el gasto ( $q_{ij}$ ) con la presión del fluido en sus extremos (nodos  $i$  y  $j$ ). En el caso de tuberías se cuenta con ecuaciones como la de Weymouth, Panhandle, etc.; pero en general, éstas pueden reducirse algebraicamente a la forma siguiente:

$$q_{ij} = C_{ij} \left| \frac{P_i^2}{Z_i} - \frac{P_j^2}{Z_j} \right|^n \quad (2)$$

en donde:  $C_{ij}$  es el coeficiente de transmisión de la tubería, el cual es función de: la longitud, diámetro de la tubería, densidad del gas, temperatura media de flujo, condiciones base y eficiencia de flujo;  $P_i$  es la presión del fluido en el nodo  $i$ ;  $P_j$ , en el nodo  $j$ ;  $Z$  es el factor de compresibilidad del gas y  $n$  es un exponente que depende de la ecuación que se utilice.

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

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

$$q_{ij} = \frac{HP}{K_1 \left[ \left( \frac{P_i}{P_j} \right)^{K_2} - K_3 \right]} \quad (3)$$

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.

Al sustituir las ecuaciones (2) y (3) en la (1), se obtienen las ecuaciones de balance en los nodos en términos de la presión del fluido, de los gastos externos al sistema y del coeficiente de transmisión del conector.

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

$$\sum_{i \in N} Q_i = 0 \quad (4)$$

El problema consiste en determinar un conjunto de valores  $Q_i$  y  $P_i$  para toda  $i$  en  $N$  y un conjunto de  $d_{ij}$  y  $HP_{ij}$  para toda  $j/(i, j) \in M$  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 tiene  $N$  ecuaciones con  $2N + M$  incógnitas. ( $N$  valores de  $P$ ,  $N$  de  $Q$  y  $M$  de  $d$  o  $HP$ ), por lo que se requiere asignar valores a  $N + M$  variables, quedando  $N$  variables como incógnitas. La asignación de valores debe hacerse de tal modo que las ecuaciones resultantes sean linealmente independientes. Como la suma algebraica de los gastos exteriores debe ser igual a cero, si se desean fijar los gastos, estos deben cumplir lo anterior, en caso contrario, al menos un gasto debe quedar como incógnita, en cuyo caso el modelo balancea los gastos externos, ya que la ecua

ción (4) es dependiente de las N ecuaciones (1).

El procedimiento de solución, del método Stoner, se presenta a grandes rasgos, en el siguiente diagrama de bloques.

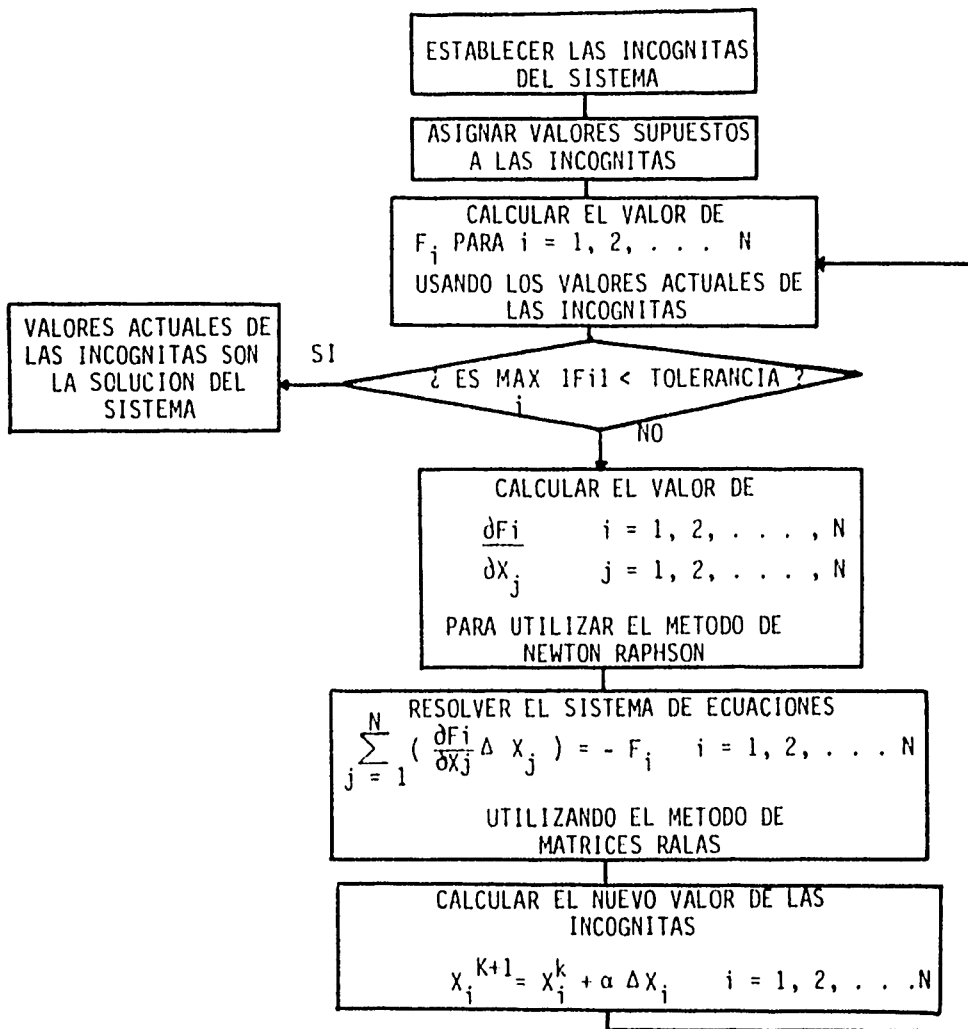


Fig. 3.- Diagrama de bloques del procedimiento de cálculo.

## 2. Método de Newton-Raphson

Al substituir las ecuaciones (2) y (3) en la (1), nos da como resultado un sistema de ecuaciones simultáneas no lineales, para resolver este sistema se utiliza el método de Newton-Raphson, por ser éste uno de los métodos de solución más aplicados en este tipo de problemas. (6), (1)

Debido a que es un método iterativo, es necesario proporcionar a las incógnitas, valores iniciales supuestos. Estos valores se toman como base para obtener un conjunto de correcciones las que sumadas a los valores iniciales, harán que los valores supuestos se acerquen más a la solución del sistema de ecuaciones. Las iteraciones se continuarán hasta que el conjunto de valores corregidos, satisfagan el conjunto de ecuaciones (1) dentro de cierta tolerancia.

El valor de las incógnitas en la iteración  $k+1$ , está dado por:

$$x_i^{k+1} = x_i^k + \Delta x_i^{k+1} \quad i \in N \quad (5)$$

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

$$J(\vec{x}^k) \cdot \Delta \vec{x}^{k+1} = -F(\vec{x}^k) \quad (6)$$

El cual puede expresarse en forma matricial, de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial X_1} & \frac{\partial F_1}{\partial X_2} & \dots & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial X_n} \\ \frac{\partial F_2}{\partial X_1} & \frac{\partial F_2}{\partial X_2} & \dots & \dots & \frac{\partial F_2}{\partial X_n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \dots & \cdot \\ \frac{\partial F_n}{\partial X_1} & \frac{\partial F_n}{\partial X_2} & \dots & \dots & \frac{\partial F_n}{\partial X_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_1^{k+1} \\ \Delta X_2^{k+1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta X_n^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_1 \\ -F_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ -F_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

Las derivadas parciales para cuando los elementos son conectores como tuberías o compresoras, están dadas por:

$$\frac{\partial F_i}{\partial P_j} = - \sum_{j/(i,j) \in M} \frac{\partial F_j}{\partial P_i} \quad (8)$$

$$\frac{\partial F_i}{\partial Q_i} = 1 \quad (9)$$

$$\frac{\partial F_i}{\partial Q_j} = 0 \quad (10)$$

Para tuberías:

$$\frac{\partial F_i}{\partial P_j} = - 2 n C_{ij} P_j \left| \frac{P_i^2}{Z_i} - \frac{P_j^2}{Z_j} \right|^{n-1} \quad (11)$$

$$\frac{\partial F_i}{\partial d_{ij}^m} = S_{ij}^m c_{ij} d_{ij}^{m-1} \left| \frac{P_i^2}{Z_i} - \frac{P_j^2}{Z_j} \right|^n \quad (12)$$

Donde  $c_{ij}$  es una constante para cada tubería que multiplicada por  $d_{ij}^m$  nos da el coeficiente de transmisión de la misma, y  $m$  es un exponente que depende de la ecuación que se está aplicando.

Para compresoras:

$$\frac{\partial F_i}{\partial P_j} = - \frac{K_2 \text{ HP} \left(\frac{P_i}{P_j}\right)^{K_2} \frac{1}{P_j}}{K_1 \left[ \left(\frac{P_i}{P_j}\right)^{K_2} - K_3 \right]^2} \quad (13)$$

$$\frac{\partial F_i}{\partial \text{HP}} = \frac{1}{K_1 \left[ \left(\frac{P_i}{P_j}\right)^{K_2} - K_3 \right]} \quad (14)$$

Se puede observar que el método de Newton-Raphson reduce un problema no lineal a un procedimiento iterativo que involucra, en cada iteración, la solución de un sistema lineal.

Sin embargo, como sucede en cualquier procedimiento iterativo, la convergencia del método estará en función de la selección inicial de los valores de las incógnitas, pues cuanto mejor estén aproximados estos valores, mejor convergirá el método a la solución. Se ha encontrado en la literatura que de acuerdo a la experiencia en la aplicación del método de Newton-Raphson a este tipo de problemas, (6), (7), (1) se requiere una suposición inicial muy aproximada para que el método converja y que aún cuando converge lo hace de manera lenta y oscilatoria.

Se han sugerido algunos esquemas para evitar la divergencia y acelerar la convergencia del método. (1), (8) El esquema propuesto por Stoner (1) se encontró efectivo en todos los problemas analizados. Este método consiste en multiplicar el término de corrección  $\vec{\Delta X}_i^{k+1}$  por un factor de aceleración  $\alpha_i$ , por lo

que la ecuación (5) se modifica de la siguiente forma:

$$\bar{X}_i^{k+1} = \bar{X}_i^k + \alpha_i \Delta \bar{X}_i^{k+1} \quad (15)$$

Debido a que al principio de las iteraciones es quizás cuando más diverge el método, se utiliza un valor general de  $\alpha = 0.5$  para las dos primeras iteraciones, posteriormente para las iteraciones pares se calcula  $\alpha_i$  en función de la relación  $RA_i = \left| \frac{\Delta X_i^{k+1}}{\Delta X_i^k} \right|$ , para valores negativos de  $RA_i$ :

$$\alpha_i = 1.0 - 0.5 RA_i; \quad 0 \leq RA_i \leq 1$$

$$\alpha_i = 0.5^{RA_i}; \quad 1 \leq RA_i$$

$$\text{y para valores positivos, } RA_i = \frac{\Delta X_i^{k+1}}{\Delta X_i^k} :$$

$$\alpha_i = 1.0 + 2.0 RA_i; \quad 0 \leq RA_i \leq 1$$

$$\alpha_i = 3.0; \quad 1 \leq RA_i$$

En las iteraciones impares se toma un valor de  $\alpha = 1$  para dejar actuar libremente el método de Newton-Raphson.

Este esquema se ha encontrado efectivo en la mayoría de los casos; sin embargo, se encontró que en las últimas etapas del proceso iterativo, disminuye el ritmo de convergencia, además de que cuando se tienen tuberías muy cortas, en donde la caída de presión es muy pequeña comparada con la conductividad, se ha observado que una modificación al esquema puede mejorar el ritmo de convergencia.



Una manera empírica de evitar la divergencia y obtener un buen -- ritmo de convergencia<sup>(19)</sup>, resulta de asignar al factor de aceleración  $\alpha$  valores cíclicos generales para todas las correcciones; estos valores son: 0.5 para la primera iteración, 0.6 para la segunda y 1.0 para la tercera, continuando cíclicamente con estos mismos valores en las siguientes iteraciones.

Se ha observado en el uso de este esquema, que generalmente se obtiene la convergencia en un tiempo adecuado y que la mayoría de los casos de divergencia son ocasionados por tratar de simular casos irreales de sistemas de - gas.

Un caso irreal, como por ejemplo, sería el de fijar un gasto de--terminado que pase a través de una tubería, pero de acuerdo a los datos de presiones en los extremos de la misma y de las características geométricas de la - tubería, el gasto que pasaría sería diferente al fijado, por lo que el método - no convergería.

Sin embargo, si el sistema a simular no presenta casos como el anterior y se llegara a tener algún problema de convergencia con este método, puede probarse el esquema propuesto por M.A. Stoner (mostrado en la página ante---rior).

### 3. Solución de Matrices Ralas.

Se observa que al aplicar el método de Newton-Raphson en la solución del problema, se tiene que resolver un sistema de  $N$  ecuaciones lineales para cada iteración, lo cual limita su aplicación manual a sistemas menores de 8 nodos. Para resolver sistemas mayores se debe hacer uso de una computadora, pero con esta herramienta se puede requerir mucho tiempo de máquina si la inversión de la matriz  $J(X_i)$  se ejecuta aplicando métodos convencionales.

Sin embargo, se puede notar que:

- a) La matriz asociada al sistema de ecuaciones es "rala".
- b) La estructura de la matriz no varía durante el proceso iterativo

La estructura de una matriz típica, del sistema mostrado en la Fig. 2, se presenta en la Fig. 4. En esta figura, las "X" representan a los elementos de la matriz que son diferentes de cero, donde éstos representan el 9.3% del total de los elementos de esta matriz. Este porcentaje se reduce más en sistemas mayores. Si se aplicara un método convencional para la inversión de la matriz consumiría mucho tiempo en operaciones innecesarias, lo que lo haría aplicable sólo en computadoras de gran capacidad y a altos costos de cómputo.

Estas observaciones fueron notadas por M. Stoner,<sup>(2)</sup> que para evitar dicha limitación, propuso usar el concepto de almacenamiento compacto de los elementos de la matriz presentado A. Chang,<sup>(9)</sup> mediante el cual sólo los elemen-

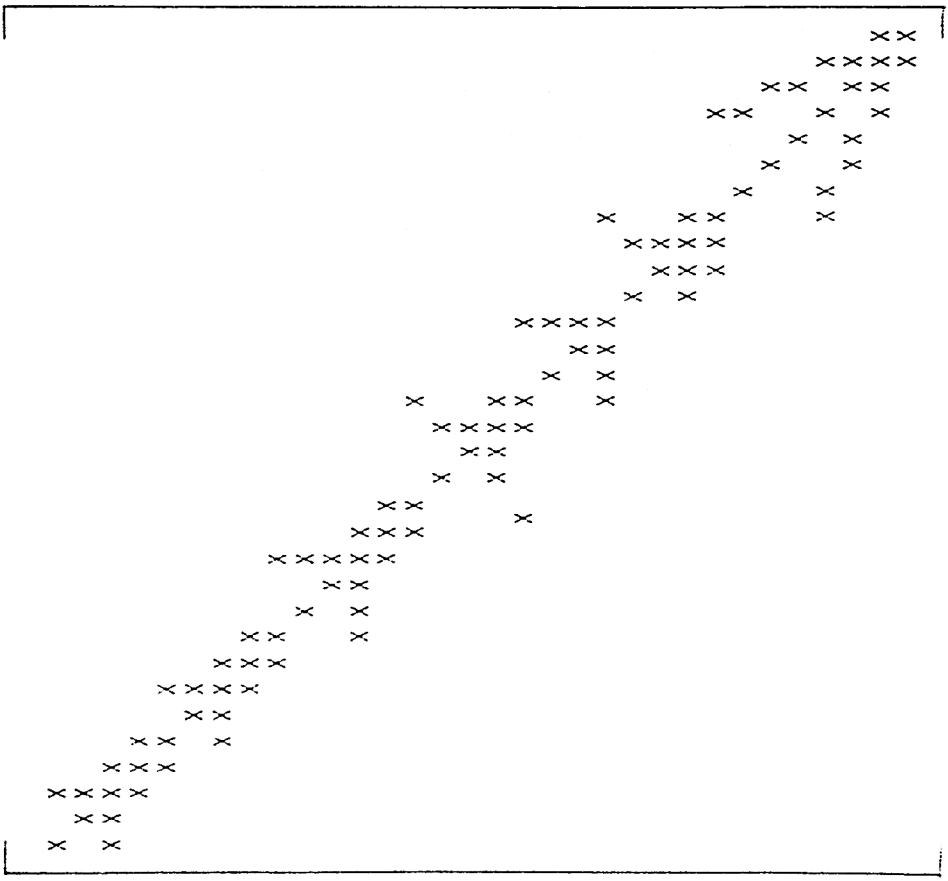


Fig. 4.- Estructura de la matriz asociada al sistema mostrado en la Fig. 1.

tos diferentes de cero se almacenan en forma vectorial, y utilizar estos vectores para aplicar el método de eliminación de Gauss. De esta manera se logró una reducción substancial en el tiempo de cálculo. Sin embargo, la aplicación de este método de eliminación, incorpora al problema de la solución otro aspecto muy importante que no fue considerado por M. Stoner: la generación de elementos diferentes de cero durante el proceso de eliminación.

Durante el proceso de eliminación de Gauss, el número de elementos generados en una matriz rala puede llegar a ser mayor del 100%, lo cual produce un mayor número de cálculos y la necesidad de mayor uso de memoria en la computadora. Este porcentaje esta relacionado con el número original de elementos.

Normalmente, al aplicar un método de eliminación, se ordenan las incógnitas y las ecuaciones con el objeto de controlar la exactitud numérica de los resultados. En problemas donde intervienen matrices ralas, el ordenamiento tiene otro objetivo, el cual es limitar el número de elementos diferentes de cero que se generan durante el proceso de eliminación. En general este objetivo no es compatible con el anterior, pero en vista de la naturaleza del problema y de la precisión con que se dispone en las computadoras modernas, el control de la precisión pasa a segundo término. Además al limitar la generación de elementos diferentes de cero, el error de redondeo se reduce, como una consecuencia de la disminución del número de operaciones.

Existen diferentes métodos para lograr un ordenamiento óptimo

o casi óptimo de las incógnitas.<sup>(10)</sup>, (11), (12) Estos métodos fueron desarrollados para el análisis de sistemas de distribución de energía eléctrica, en los cuales, las redes resultantes no son semejantes a las que se presentan en sistemas de distribución o recolección de fluidos. Además, el tiempo necesario para la aplicación de métodos exactos,<sup>(12)</sup> desvirtúa sus ventajas.

En vista de las limitaciones anteriores, el Dr. Limón<sup>(19)</sup> procedió a desarrollar un nuevo algoritmo que fuera rápido de aplicar y proporcionara un ordenamiento 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.

Con esto se logra un ordenamiento óptimo en algunos casos y cercano al óptimo en otros; sin embargo, con las modificaciones realizadas en este trabajo al programa, en algunos casos se pierde un poco de optimización en el arreglo de los elementos, pero la generación de elementos diferentes de cero durante la inversión de la matriz continua siendo menor que el método usado por M. Stoner.

Como se mencionó anteriormente, la solución de la matriz se realiza aplicando el método de Gauss, cuyo procedimiento puede verse en el libro de S. D. Conte.<sup>(13)</sup> A continuación se describe la implementación de este procedimiento desde el punto de vista de A. Chang,<sup>(9)</sup> en donde solamente los elementos diferentes

de cero son almacenados y manipulados.

No se utilizan matrices bidimensionales, en su lugar se emplean 3 vectores: el vector A, donde se almacenan todos los elementos de la matriz diferentes de cero en forma continua y por renglón; el vector JA, de igual dimensión a A, que contiene el número de la columna del correspondiente elemento de A y el vector IA, el cual indica la posición en A, del primer elemento diferente de cero del renglón i de la matriz, este vector tiene una dimensión igual al número de renglones más uno, con el fin de especificar el número de elementos del último renglón.

Para mostrar lo anterior, tomemos como ejemplo la siguiente matriz:

	1	2	3	4	5
Renglones (Ecuaciones)	1.0	-6.2			
		7.9	-4.5	8.5	
		-1.7	9.9	-8.5	
			-3.6		
			-1.8		1.0

Fig. 5 Ejemplo de una matriz rara.

En donde los elementos de A, JA e IA son:

A	1.0	-6.2	7.9	-4.5	8.5	-1.7	9.9	-8.5	-3.6	-1.8	1.0
JA	1	2	2	3	4	2	3	4	3	3	5
IA	1	3	6	9	10	12					

Fig. 6

También se almacenan estos mismos valores en los vectores U, JU e IU, cuya estructura es semejante a la de los vectores A, JA e IA; esto es esencialmente lo mismo que usa A. Chang<sup>(9)</sup>, para la solución de un problema de matriz simétrica. Los vectores U, JU e IU sufrirán cambios durante la solución del sistema de ecuaciones, manteniéndose invariables los vectores A, JA e IA.

Debido a que se resuelve un sistema de ecuaciones lineales repetidas veces, por encontrarse éste dentro de un método iterativo, cuyo número de iteraciones varía normalmente de 5 a 15 y a que en el sistema de ecuaciones lineales la estructura de A no varía durante las iteraciones y los elementos individuales de A pueden ser consistentes en valor en las últimas iteraciones.

Es conveniente almacenar en un vector, al cual se le llamará IHW, la información de pivoteo de cada uno de los renglones, puesto que ésta no cambiará durante las iteraciones requeridas, además de que será posible utilizar la misma U para unas pocas iteraciones antes de llegar a la solución de A. De manera, que el consumo de tiempo de búsqueda de elementos en U, se evita para cada iteración del método de Newton-Raphson.

La información de IHW queda almacenada de la siguiente manera:

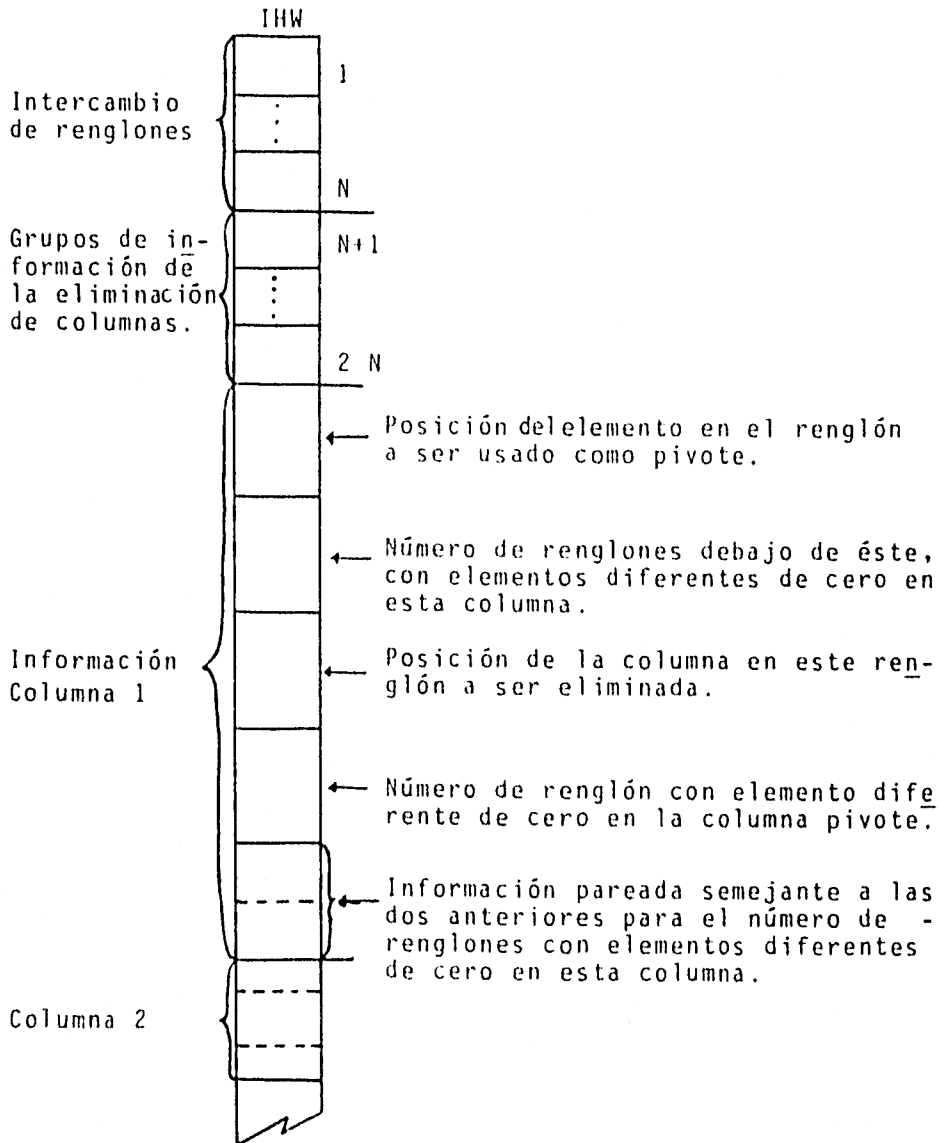


Fig. 7.- Diagrama del vector que almacena la información de eliminación por pivoteo.

Los primeros  $N$  valores de IHW (donde  $N$  es el número de ecuaciones o renglones), mantienen la información del intercambio de renglones, donde  $d_i$



cho intercambio es únicamente para tener elementos diferentes de cero en la diagonal principal y no para tomar el mayor valor de la columna como pivote. Este intercambio de renglón es indicativo únicamente, pues los valores no son movidos físicamente en U.

Los siguientes N valores, de IHW (N + 1) a IHW (2 N), indican en que parte del vector IHW principia la información de la eliminación de los elementos diferentes de cero debajo del renglón pivote. Ya que la información para cada columna es de longitud variable, el valor de IHW (N + 2) se proporciona hasta terminar el proceso de eliminación para la columna 1. Esta información del proceso de eliminación por columna puede observarse en la fig. 7. El proceso continúa hasta almacenar en IHW (2 N) el principio de la información de grupo de la última columna, en cuyo caso sólo se almacena la posición dentro del renglón de esta columna y un cero en el siguiente IHW, por no haber renglones restantes.

Tómese como ejemplo la matriz mostrada en la Fig. 5, el primer paso es verificar si existe algún renglón compuesto de puros ceros, esto se determina comparando dos valores consecutivos de IA, si son iguales, significa que A contiene un renglón lleno de ceros, lo que indica que la matriz es singular. El siguiente paso es copiar los valores de A hacia U, IA hacia IU y JA hacia JU. Posteriormente se verifica si existe en la diagonal principal algún elemento igual a cero, en cuyo caso se hacen cambios de renglones para corregir esto; en el ejemplo el renglón cuatro tiene un cero en la diagonal principal, esto se arregla cambiando el renglón cuatro por el tres, pero no se hace físicamente en U, sino sólo

queda indicado en el vector IHW, el cual toma los siguientes primeros cinco valores: 1, 2, 4, 3 y 5.

A continuación se anota en la casilla  $N + 1$  de IHW el valor  $2N + 1$ , para el ejemplo  $IHW(6) = 11$ , donde se indica que a partir del casillero 11 de IHW comienza la información de la eliminación de la columna 1. En el ejemplo, la posición del pivote en el renglón es 1 y el número de elementos diferentes de cero debajo de éste es cero, estos dos valores 1 y 0 deben guardarlos en IHW (11) y (12) respectivamente. Luego se lee en IHW (2) cual es el renglón que sigue, en el ejemplo es el número 2, se anota en IHW (7) el valor de 13, donde a partir de esta casilla de IHW se anotará la información concerniente a la eliminación de este renglón, la cual será la posición del elemento pivote en el renglón, el número de elementos diferentes de cero en esta columna debajo del renglón pivote, que es 1 para este ejemplo, la posición de este elemento en su renglón y el número del renglón. Luego se hacen las operaciones para la eliminación de este elemento, en caso de que durante este proceso se genere un elemento diferente de cero, éste debe insertarse en el vector U en su posición correspondiente y también deben hacerse las modificaciones pertinentes a los vectores IU y JU.

El siguiente renglón pivote es el 4 y los renglones con elementos diferentes de cero debajo de él son el 3 y el 5, aunque el 3 no se encuentra físicamente debajo de el 4 en el vector U sí lo está en forma indicativa en el vector IHW.

El proceso de eliminación se continúa hasta tener toda la in-

formación referente a este proceso almacenada en el vector IHW. Al término de éste los vectores U, JU, IU e IHW quedan de la siguiente manera:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
U	1.0	-6.2	7.9	-4.5	8.5	-1.7	8.93	-6.67	-3.6	-1.8	1.0
JU	1	2	2	3	4	2	3	4	3	3	5
IU	1	3	6	9	10	12					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
IHW	1	2	4	3	5	11	13	17	23	25	1
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
IHW	0	1	1	1	3	1	2	2	3	1	4
	23	24	25	26							
IHW	3	0	2	0							

Fig. 8 Vectores al término de la triangularización.

Como se puede observar la eliminación por renglón no se lleva a cabo en forma física, sino que sólo queda grabada en IHW; esto se realiza de esta manera debido a que los valores son usados para llevar a cabo posteriormente la modificación del vector de términos independientes  $\{b\}$  en el vector  $\{c\}$ , para que por medio de una sustitución regresiva se obtenga el vector solución  $\{x\}$  de la matriz triangular  $\{U\}$  y del vector  $\{c\}$ .

### III. PROGRAMA DE COMPUTO

#### I. Programa de Cómputo Original.

El programa de cómputo FLUPER, creado para el análisis y diseño de redes de recolección y distribución de gas en régimen permanente, está programado en lenguaje FORTRAN, el cual consta de las siguientes partes principales:

Lectura de datos.- En donde se proporcionan al programa algunos parámetros como son: la densidad del gas, temperatura media de flujo, condiciones base, eficiencia de transporte de las tuberías, ecuación a usar en el cálculo (Weymouth, Panhandle A o B), etc. Datos para los nodos: gastos, presiones y elevaciones. Datos para los conectores: longitud, diámetro o potencia y eficiencia particular del conector.

A continuación se realiza un ordenamiento casi óptimo de los nodos para evitar la generación de muchos elementos diferentes de cero durante la solución de la misma.

Luego se realiza la generación de los vectores IA y JA, que como se menciona en la teoría, sirven para ubicar los elementos del vector A dentro de la matriz A .

La generación del arreglo NOHOW es una parte muy importante -

dentro del programa, debido a que este arreglo asocia a cada conector del sistema unos índices que colocan los valores de las derivadas con respecto a las incógnitas en su lugar correspondiente dentro del vector A. La importancia de este arreglo radica en que el programa coloca las derivadas en el vector A una sola vez durante la ejecución del programa y no necesita durante cada iteración volver a generar y reubicar las derivadas.

A continuación principia la parte iterativa del método en donde se calculan las ecuaciones de balance de cada nodo  $F$ , ecuación (1), las derivadas de las ecuaciones ( $F$ ) con respecto a las incógnitas, ecuaciones (8) a (14). Con los cálculos anteriores se genera el vector A, el cual queda listo para el caso en que el balance de nodos (ecuaciones ( $F$ )), no satisfagan la tolerancia preescogida.

Si no se satisface la tolerancia, debe aplicarse el método de Newton-Raphson para calcular los incrementos o decrementos, según sea el caso, ecuaciones (7) y (15) para aproximarse a la solución del problema.

Para la solución de las ecuaciones (7), el programa utiliza las siguientes subrutinas, las cuales aprovechan las características de la matriz.

SPARFA.- Aplica el método de eliminación de Gauss en la primera iteración, la información relacionada con el proceso de eliminación se almacena en el vector IHW, la matriz triangular superior obtenida de dicha eliminación

queda almacenada en los vectores U, IU, JU, cuya estructura es semejante a los vectores A, IA y JA.

SPARR.- Utiliza la información generada en SPARFA, referente a la eliminación, para efectuarla en las siguientes iteraciones.

SPARVE.- Se efectúan en el vector de términos independientes las mismas operaciones que se realizaron sobre la matriz durante el proceso de eliminación. En las últimas iteraciones, cuando el valor de los coeficientes de la matriz varía muy poco, se llama a esta subrutina directamente, sin llamar a -- SPARR.

SPARBS.- Obtiene la solución del sistema de ecuaciones, realizando una substitución regresiva en el vector U.

Al terminar la ejecución de estas 4 subrutinas, se regresa al programa principal, se calculan los nuevos valores de las incógnitas, ecuación (15) y continúa el proceso iterativo hasta satisfacerse la tolerancia, en cuyo momento se procede a imprimir los resultados en forma tabulada.

## 2. Modificaciones al Programa de Cómputo.

Para llevar a efecto los cálculos para el diseño y análisis de redes de recolección y distribución de gas por tuberías con el programa original, se requiere suponer diámetros y/o potencias en las compresoras y fijar gastos y presiones. El programa calcula los gastos y presiones que no fueron proporcionados como dato y se debe observar si no se salen del rango establecido, en caso contrario, se determinan qué diámetros de tuberías o potencias de compresoras deben modificarse; ya sea que estén sobradas o que no tengan capacidad.

Con el programa presentado en este trabajo, estas condiciones de operación se fijan, y se dejan como incógnitas aquellos diámetros y/o potencia de compresoras que se requieren calcular.

Para que el programa pudiera hacer lo mencionado anteriormente, fue necesario modificar varias partes de éste con el fin de tomar en cuenta a los conectores también como incógnitas además de la presión o el gasto de los nodos.

Algunos de los cambios consistieron en modificar la generación de los vectores IA y JA, de manera tal que mantuvieran su misma función de poder relacionar los elementos del vector A con su posición en la matriz A .

Las derivadas respecto a los conectores se calculan en el pro

grama tomando en cuenta el sentido de flujo dentro del conector y se acomodan en la matriz  $A$ , tratando de mantener una estructura matricial tal que no genere muchos elementos diferentes de cero.

Al introducir estos valores en la matriz, se debe hacer notar que los términos de corrección  $\alpha$ , los cuales evitan la divergencia en el cálculo del vector solución, se mantienen con los mismos valores mencionados anteriormente, ya sea usando los valores recomendados por T. Limón<sup>(19)</sup> o utilizando los valores propuestos por M. A. Stoner; sin embargo, se debe tener mucho cuidado en la selección de las variables incógnitas: presión, gasto, diámetro o potencia. Pues con este nuevo programa es más fácil fijar las variables de tal manera que el sistema no tenga solución por tratar de simular con el programa sistemas irreales.

En la solución del sistema lineal de ecuaciones por medio del método de solución de matrices ralas, fue necesario realizar algunas modificaciones, pues las subrutinas que resuelven el sistema de ecuaciones lineales fueron programadas considerando que siempre existirían elementos diferentes de cero en la diagonal principal. Pero con las modificaciones del programa, algunas simulaciones pueden generar matrices que no sean todos los elementos de la diagonal principal diferentes de cero, por lo que se necesitan operar cambios en la matriz para evitar lo anterior.



Las subrutinas referentes a dicha solución se modificaron con el fin de detectar qué renglones no tienen elementos diferentes de cero para realizar un intercambio de renglones; pero como se mencionó en la teoría el intercambio de renglones no se realiza en forma real en la matriz U, sino que sólo se efectúa de manera indicativa dentro del vector IHW, al cual tuvo que agregarsele N valores más para almacenar esta información.

Por lo que las subrutinas SPARFA, SPARRR y SPARVE tuvieron que ser modificadas para seguir obteniendo los mismos resultados, pero tomando en cuenta que la colocación de los elementos de la matriz U pudiera estar cambiada dentro de la información del vector IHW, sin que realmente estuviera alterada en la matriz U.

Debido a las modificaciones realizadas en este programa, debe tomarse en cuenta que durante las iteraciones los valores del diámetro o la potencia, pudieran pasar a ser valores negativos como parte de una solución de un modelo matemático, cuando sucede esto, el programa presenta la advertencia de que se encontró un conector negativo, por lo que deben revisarse los datos proporcionados al programa y analizar si al fijar los mismos no se cometió alguna equivocación y se pretende simular algo irreal.

#### IV. APLICACION

Supóngase que se desea diseñar un sistema de recolección y distribución de gas como el mostrado en la Fig. 1, los gastos y presiones establecidos como base de diseño se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 1. Datos de gastos y presiones.

Nombre del Nodo	Gasto (Q) MMPCD	Presión (P) lb/pg <sup>2</sup>
ESRE1	- 5.5	950
ESRE2	- 7.2	1000
ESRE3	- 6.8	970
ESRE4	- 10.3	900
ESRE5	- 8.6	880
ESRE6	- 9.2	900
ESRE7	- 8.0	760
ESRE8	- 9.8	800
ESRE9	- 7.1	750
ESRE10	- 10.7	800
CONS1	10.5	550
CONS2	15.3	550
CONS3	18.2	550
CONS4	21.7	900
CONS5	17.5	900

Nota: el signo menos en el gasto indica gasto adicionado al sistema y el gasto positivo indica extracción.

Los nodos cuyo nombre comienza con ESRE son estaciones de recolección de gas y los que empiezan con CONS son nodos de consumo o puntos de entrega del gas.

Además de las anteriores condiciones de flujo, se consideraron los siguientes parámetros:

Presión base	= 14.7 lb/pg <sup>2</sup>
Temperatura base "	= 60°F
Temperatura media de flujo	= 95°F
Densidad relativa del gas	= 0.65
Presión de succión	= 600 lb/pg <sup>2</sup>

En la Fig. 1 se observan algunas incógnitas (diámetros de tuberías y potencia de compresoras). Al calcularse éstos, se obtiene la ingeniería básica del diseño.

Además de los parámetros mencionados, existe uno muy importante, la eficiencia de transporte de la tubería; cuya determinación comprende dos aspectos.

i) Sistemas nuevos.

Cuando se desea diseñar un sistema nuevo, no existen datos medidos de presión y gastos, por lo cual el factor de eficiencia, según la literatura técnica <sup>(14)</sup> es de 0.9 a 0.92; sin embargo, debido a que la ecuación de flujo no comprende los aspectos de conexiones, válvulas, etc., se recomienda utilizar 0.8 para dar un pequeño margen de capacidad al sistema.

ii) Sistemas existentes.

En estos sistemas se recomienda recolectar datos medidos de presiones y gastos; obtener para cada tubería el factor de eficiencia correspondien

te, mediante la ecuación de flujo de gas, y utilizar estos factores de eficiencia para cálculos posteriores en el sistema.

De igual manera debe obtenerse la eficiencia para las compresoras, en cuyo caso para sistemas nuevos se les asignan valores 0.82 a 0.83.<sup>(15)</sup>

Con los aspectos mencionados, se procedió a diseñar el sistema con el programa original y con el propuesto en este trabajo. Suponiendo los mismos valores iniciales en ambos programas para aquellas presiones, diámetros o potencias desconocidas.

Para llevar a efecto el diseño con el programa original fue necesario correrlo diez veces, debido a que deben suponerse varios diámetros de tuberías y calcularse en forma separada la potencia de las compresoras; proporcionándole esto último al programa posteriormente como dato.

En cambio, el programa propuesto en este trabajo, calcula directamente los diámetros y la potencia necesaria; el usuario del programa debe revisar los resultados y seleccionar los diámetros y potencia comerciales. Por lo que para obtener el diseño con este programa sólo es necesario realizar dos corridas.

Lo anterior implicó una relación de costos de 5 a 1 entre el programa anterior y el propuesto respectivamente, en lo referente a computación; -

además de que se requieren también aproximadamente la misma relación en horas/hombre para llevar a efecto el diseño.

En la tabla 2 y figura 9 se presentan los resultados con el programa original, debido a que con éste se suponen los diámetros, estos se suponen comerciales por lo que no se pueden satisfacer exactamente las condiciones establecidas, así que se escogen los diámetros mínimos comerciales que satisfagan lo más cercano posible a dichas condiciones.

Como con el programa propuesto se fijan las condiciones de operación y se calculan los diámetros y potencias, éstos resultan no comerciales (tabla 3), por lo que se debe buscar en algún catálogo sobre tuberías comerciales<sup>(16)</sup>, el diámetro inmediato superior, de igual manera se procede con la potencia de las compresoras. Ya con los valores comerciales, se proporcionan como dato al programa y éste calcula las presiones para dichos diámetros. Los resultados se muestran en la Fig.10 y tabla 4.

Se puede observar que los resultados son prácticamente los mismos a los obtenidos con el programa original, a excepción de los diámetros de las tuberías de distribución de los puntos de entrega 4 y 5, y la potencia en la compresora 3.

La diferencia se debe a que con el programa original se supuso la tubería de 10" y en base a ésta se realizaron los demás cálculos; en cambio, el

\*\*\*\*\*  
 RESULTADOS CORRIDA 1  
 \*\*\*\*\*

SE ALCANZO CONVERGENCIA EN 10 ITERACIONES

N O D O S		IDENT.	TIPO	T U B E R I A		COMPRESORA POTENCIA (HP)	COEFICIENTE DE TRANSMISION	FACTOR DE CORRECCION DEL CONEC.	GASTO (MMCF/DIA)	P R E S I O N E S	
INICIAL I	FINAL J			LONGITUD (PMS)	DIAMETRO (PG)					ENTRADA (LR/PG2)	SALIDA (LR/PG2)
ESR1	-	N000F	TU1	TUB.	3.200	2.563	.0034	.8000	5.500	687.205	719.333
N000A	-	N000B	TU2	TUB.	1.000	6.175	.1377	.8000	-14.000	719.333	724.254
N000B	-	ESR2	TU3	TUB.	1.200	2.563	.0118	.8000	-7.200	724.254	874.197
N000B	-	ESR3	TU4	TUB.	2.100	2.563	.0109	.8000	-6.200	724.254	690.353
N000A	-	N000C	TU5	TUB.	5.400	12.000	.3195	.8000	19.500	719.333	717.513
N000C	-	ESR4	TU6	TUB.	2.800	2.563	.0110	.8000	-16.300	717.513	662.790
N000C	-	N000D	TU7	TUB.	3.200	12.000	.4172	.8000	29.800	717.513	715.076
N000D	-	N000E	TU8	TUB.	3.200	6.175	.0749	.8000	-17.800	715.076	740.786
N000E	-	ESR5	TU9	TUB.	2.800	3.750	.0159	.8000	-6.000	740.786	650.156
N000E	-	ESR6	TU10	TUB.	4.200	4.124	.0294	.8000	-5.200	740.786	600.673
N000B	-	N000F	TU11	TUB.	4.700	12.000	.3929	.8000	47.000	715.076	705.790
N000F	-	ESR7	TU12	TUB.	2.900	4.124	.0294	.8000	-6.000	705.796	739.642
N000F	-	ESR8	TU13	TUB.	3.200	4.124	.0250	.8000	-9.800	705.796	760.491
N000F	-	N000G	TU14	TUB.	6.100	12.000	.3302	.8000	65.400	706.796	682.671
N000G	-	N000H	TU15	TUB.	1.500	6.175	.1127	.8000	-17.800	682.671	655.333
N000H	-	ESR9	TU16	TUB.	3.800	4.124	.0251	.8000	-7.100	695.333	730.506
N000H	-	ESR10	TU17	TUB.	2.300	4.124	.0333	.8000	-14.700	695.333	743.071
N000B	-	N000I	TU18	TUB.	12.000	12.000	.2074	.8000	83.200	682.671	599.843
N000I	-	N000J	COMP	COMP			1210.0		83.200	599.843	764.406
N000J	-	N000K	TU19	TUB.	23.000	12.000	.1499	.8000	83.200	764.406	620.652
N000K	-	CON51	TU20	TUB.	6.200	6.175	.0593	.8000	10.500	620.652	595.668
N000K	-	CON52	TU21	TUB.	7.300	6.175	.0507	.8000	15.300	620.652	567.395
N000K	-	N000L	TU22	TUB.	1.200	12.000	.2578	.8000	17.400	620.652	599.786
N000L	-	N000M	COMP	COMP			650.0		57.400	599.786	720.693
N000M	-	N000N	TU23	TUB.	37.000	12.000	.1188	.8000	57.400	720.690	605.701
N000N	-	CON53	TU24	TUB.	1.200	6.175	.1205	.8000	16.199	605.701	552.498
N000N	-	N000O	TU25	TUB.	3.400	12.000	.4035	.8000	34.196	605.701	600.211
N000O	-	N000P	COMP	COMP			1050.0		34.200	600.211	916.846
N000P	-	N000Q	TU26	TUB.	12.900	12.000	.2047	.8000	39.200	916.846	903.846
N000Q	-	CON54	TU. 7	TUB.	3.000	12.000	.2490	.8000	21.703	903.846	501.033
N000Q	-	CON55	TU. 8	TUB.	7.500	12.000	.1710	.8000	17.502	903.846	500.000

CUANDO EL GASTO ES (-) INDICA FLUJO DE J A I

\*\*\* NOTA \*\*\*

SE EMPLEO LA ECUACION DE

PARDHANDLE B.

NO EXISTE CORRECCION POR ELEVACION

EFICIENCIA DE LA LINEA .8000

Tabla 2

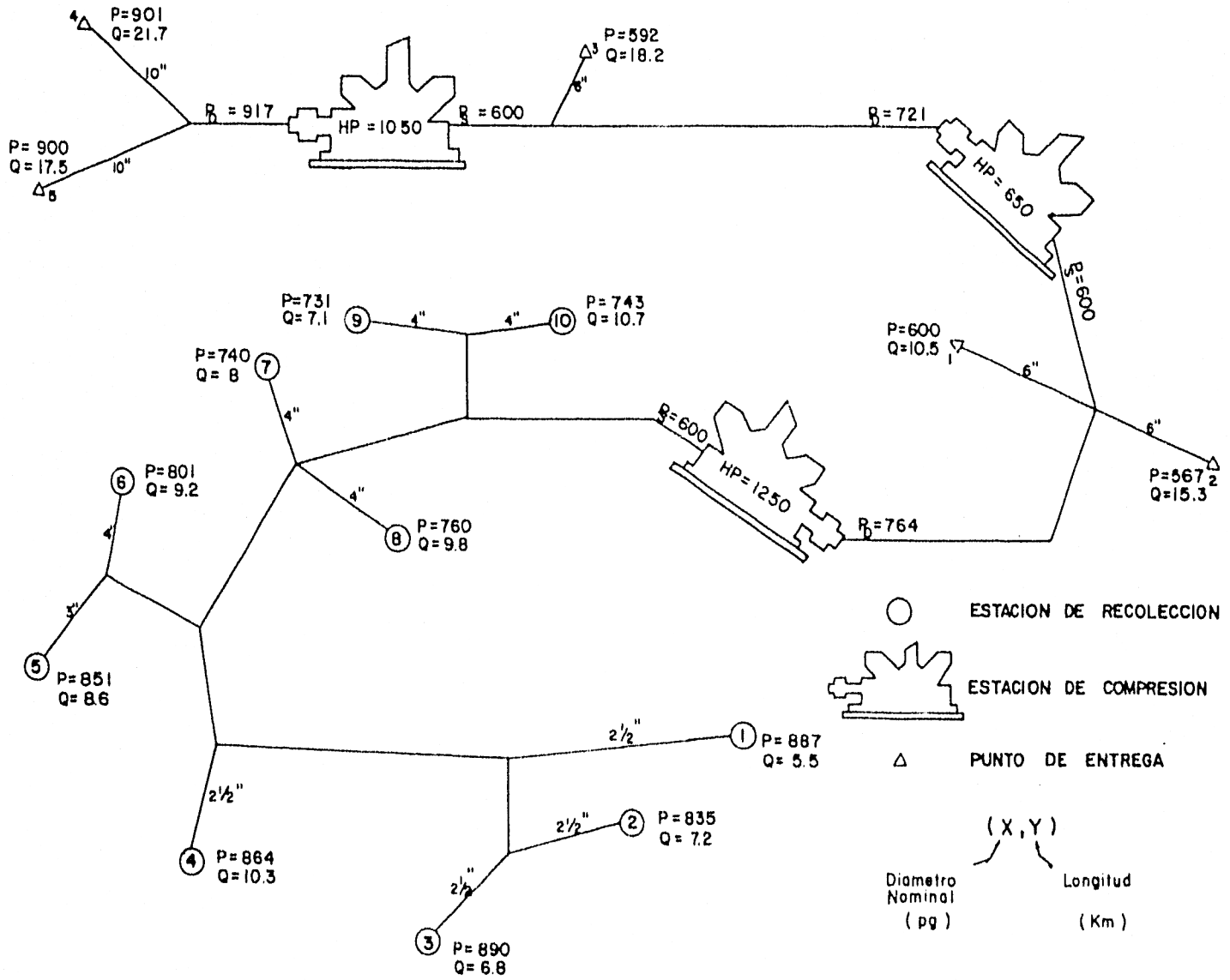


Fig.9 - Resultados del Sistema Ejemplo con el Programa Original

\*\*\*\*\*  
 RESULTADOS CORRIDA 1  
 \*\*\*\*\*

SE ALCANZO CONVERGENCIA EN 16 ITERACIONES

N O D O S INICIAL I	FINAL J	IDENT.	TIPO	T U B S DIAMETRO (PG)	E R R I A LONGITUD (KM)	COMPRESORA POTENCIA (HP)	COEFICIENTE DE TRANSMISION	FACTOR DE CORRECCION DEL CONEC.	GASTO (MMCF/DIA)	P R E S I O ENTRADA (LB/PG2)	W E S SALIDA (LB/PG2)
ESPE1	-	N0P0A	TU1	TU3.	2.383	3.200	.0070	.8000	5.500	950.000	719.461
N0LOA	-	N0N0B	TU2	TU9.	6.000	1.000	.1307	.8000	-14.000	719.461	724.909
N0LOB	-	ESPE2	TU3	TU9.	2.081	1.200	.0082	.8000	-7.200	724.909	1000.000
N0LOB	-	ESPE3	TU4	TU8.	2.343	2.100	.0083	.8000	-6.800	724.909	970.000
N0LOA	-	N0N0C	TU5	TU3.	12.000	5.400	.3195	.8000	19.500	719.461	717.811
N0LOC	-	ESPE4	TU5	TU8.	2.439	.800	.0150	.8000	-10.300	717.641	900.000
N0LOC	-	N0N0D	TU7	TU3.	12.000	3.200	.4172	.8000	29.800	717.641	715.155
N0LOD	-	N0N0E	TU8	TU9.	6.000	3.300	.0711	.8000	-17.800	715.156	743.622
N0LOE	-	ESPE5	TU9	TU8.	3.097	2.800	.0145	.8000	-8.600	743.622	880.000
N0LOE	-	ESPE6	TU10	TU8.	3.348	4.200	.0144	.8000	-9.200	743.622	900.000
N0LOD	-	N0N0F	TU11	TU8.	12.000	4.700	.3429	.8000	47.600	715.156	705.927
N0LOF	-	ESPE7	TU12	TU3.	3.740	2.900	.0230	.8000	-3.000	705.927	760.000
N0LOF	-	ESPE8	TU13	TU3.	3.674	3.200	.0209	.8000	-9.800	705.927	800.000
N0LOF	-	N0N0G	TU14	TU3.	12.000	6.100	.3002	.8000	65.400	705.927	683.036
N0N0G	-	N0N0H	TU15	TU3.	6.000	1.500	.1063	.8000	-17.800	683.036	596.702
N0LOH	-	ESPE9	TU16	TU3.	3.791	3.400	.0207	.8000	-7.100	696.792	750.000
N0LOH	-	ESPE10	TU17	TU3.	3.494	2.300	.0218	.8000	-10.700	696.192	830.000
N0LOG	-	N0N0I	TU18	TU3.	12.000	12.600	.2374	.8000	83.200	683.036	600.000
N0LOI	-	N0N0J	COM1	COM2			1219.7	4.0091	.7200	83.200	600.000
N0N0J	-	N0N0K	TU19	TU3.	12.000	23.800	.1129	.8000	81.200	764.568	620.352
N0LOK	-	CONS1	TU20	TU3.	4.837	6.200	.0299	.8000	10.500	620.858	550.000
N0LOK	-	CONS2	TU21	TU3.	5.801	7.300	.0436	.8000	15.300	620.858	550.000
N0N0K	-	N0N0L	TU22	TU3.	12.000	6.200	.2278	.8000	57.400	620.858	630.333
N0LOL	-	N0N0M	COM2	COM2			617.9	2.1249	.7200	57.400	600.000
N0LOM	-	N0N0N	TU23	TU9.	12.000	37.600	.1138	.8000	57.400	720.718	605.492
N0LON	-	CONS3	TU24	TU3.	4.623	1.300	.0571	.8000	18.200	605.492	550.000
N0LON	-	N0N0O	TU25	TU3.	12.000	3.400	.4045	.8000	39.200	605.492	630.000
N0N0O	-	N0N0P	COM1	COM2			1074.9	3.5257	.7200	39.200	600.000
N0LOP	-	N0N0Q	TU26	TU9.	12.000	12.900	.2019	.8000	39.100	925.367	912.811
N0LOQ	-	CONS4	TU27	TU3.	7.400	3.600	.1160	.8000	21.701	912.511	900.000
N0LOQ	-	CONS5	TU28	TU3.	7.890	7.500	.0735	.8000	17.901	912.511	900.000

CUANDO EL GASTO ES (-) INDICA FLUJO DE J A I

\*\*\* NOTA \*\*\*

SE EMPLEO LA ECUACION DE

PANHANDLE 3.

NO EXISTE CORRECCION POR ELEVACION

EFICIENCIA DE LA LINEA .8000

Tabla 3



\*\*\*\*\*  
 RESULTADOS CORRIDA 1  
 \*\*\*\*\*

SE ALCANZO CONVERGENCIA EN 9 ITERACIONES

NO. DE SECCIONES INICIAL J	NO. DE SECCIONES FINAL K	IDEN.	TIPO	TUBERIA LONGITUD (KM)	DIAMETRO (PG)	COMPRESORA POTENCIA (HP)	COEFICIENTE DE TRANSMISION	FACTOR DE CORRECCION DEL COEF.	GASTO (MCF/DIA)	PRE S I O N E S ENTRADA (LR/PG2)	SALIDA (LR/PG2)
ESR1	-	NOB0A	T01	TUB.	3,200	2,563	.0004	.8000	5,500	887,011	710,093
NOB0A	-	NOB0B	T02	TUB.	1,000	6,125	.1377	.8000	-14,000	710,093	724,006
NOB0B	-	ESR2	T03	TUB.	1,200	2,563	.0138	.8000	-7,200	724,006	831,508
NOB0C	-	ESR3	T04	TUB.	2,100	2,563	.0104	.8000	-6,000	724,006	892,108
NOB0A	-	NOB0C	T05	TUB.	5,400	12,000	.3195	.8000	19,500	719,093	717,262
NOB0C	-	ESR4	T06	TUB.	1,000	2,563	.0179	.8000	-10,500	717,262	863,508
NOB0C	-	NOB0D	T07	TUB.	3,200	12,000	.4172	.8000	20,800	717,262	714,775
NOB0D	-	NOB0E	T08	TUB.	3,300	6,125	.0749	.8000	-17,800	714,775	740,544
NOB0E	-	ESR5	T09	TUB.	2,800	3,256	.0164	.8000	-4,600	740,544	850,450
NOB0E	-	ESR6	T010	TUB.	4,200	4,124	.0244	.8000	-9,200	740,544	800,453
NOB0D	-	NOB0F	T011	TUB.	4,700	12,000	.3429	.8000	47,600	714,775	705,540
NOB0F	-	ESR7	T012	TUB.	2,900	4,124	.0294	.8000	-8,000	705,540	730,300
NOB0F	-	ESR8	T013	TUB.	3,200	4,124	.0282	.8000	-6,000	705,540	760,257
NOB0F	-	NOB0G	T014	TUB.	6,100	12,000	.3002	.8000	65,400	705,540	683,605
NOB0G	-	NOB0H	T015	TUB.	1,500	6,125	.1120	.8000	-17,800	682,605	695,072
NOB0H	-	ESR9	T016	TUB.	3,800	4,124	.0256	.8000	-7,100	695,072	730,720
NOB0H	-	ESR10	T017	TUB.	2,300	4,124	.0331	.8000	-10,700	695,072	782,420
NOB0G	-	NOB0I	T018	TUB.	12,600	12,000	.2074	.8000	43,200	682,605	592,535
NOB0I	-	NOB0J	C019	COMP			1250.0	4,0000	83,200	592,535	764,016
NOB0J	-	NOB0K	T019	TUB.	23,800	12,000	.1499	.8000	83,201	764,016	620,156
NOB0K	-	C019	T020	TUB.	5,200	6,125	.0543	.8000	10,500	620,156	592,153
NOB0K	-	C019	T021	TUB.	7,300	6,125	.0500	.8000	15,300	620,156	566,007
NOB0K	-	NOB0L	T022	TUB.	6,200	12,000	.2973	.8000	57,400	620,156	590,270
NOB0L	-	NOB0M	C019	COMP			650.0	2,1320	57,400	590,270	720,272
NOB0M	-	NOB0N	T023	TUB.	57,600	12,000	.1180	.8000	57,400	720,272	604,940
NOB0N	-	C019	T024	TUB.	1,300	6,125	.1205	.8000	10,124	604,940	501,720
NOB0N	-	NOB0O	T025	TUB.	3,400	12,000	.4045	.8000	39,197	604,940	590,451
NOB0O	-	NOB0P	C019	COMP			1075.0	3,5250	39,200	590,451	920,552
NOB0P	-	NOB0Q	T026	TUB.	12,900	12,000	.2649	.8000	39,200	920,552	911,521
NOB0Q	-	C019	T027	TUB.	3,600	8,001	.1400	.8000	21,700	911,521	903,150
NOB0Q	-	C019	T028	TUB.	7,500	8,001	.0960	.8000	17,500	911,521	908,000

CONTINUO EN GASTO 25 (-) INDICA FLUJO DE J A I

\*\*\* NOTA \*\*\*

SE EMPLEO LA ECUACION DE :

PANDRAGUE D.

NO EXISTE CORRECCION POR ELEVACION

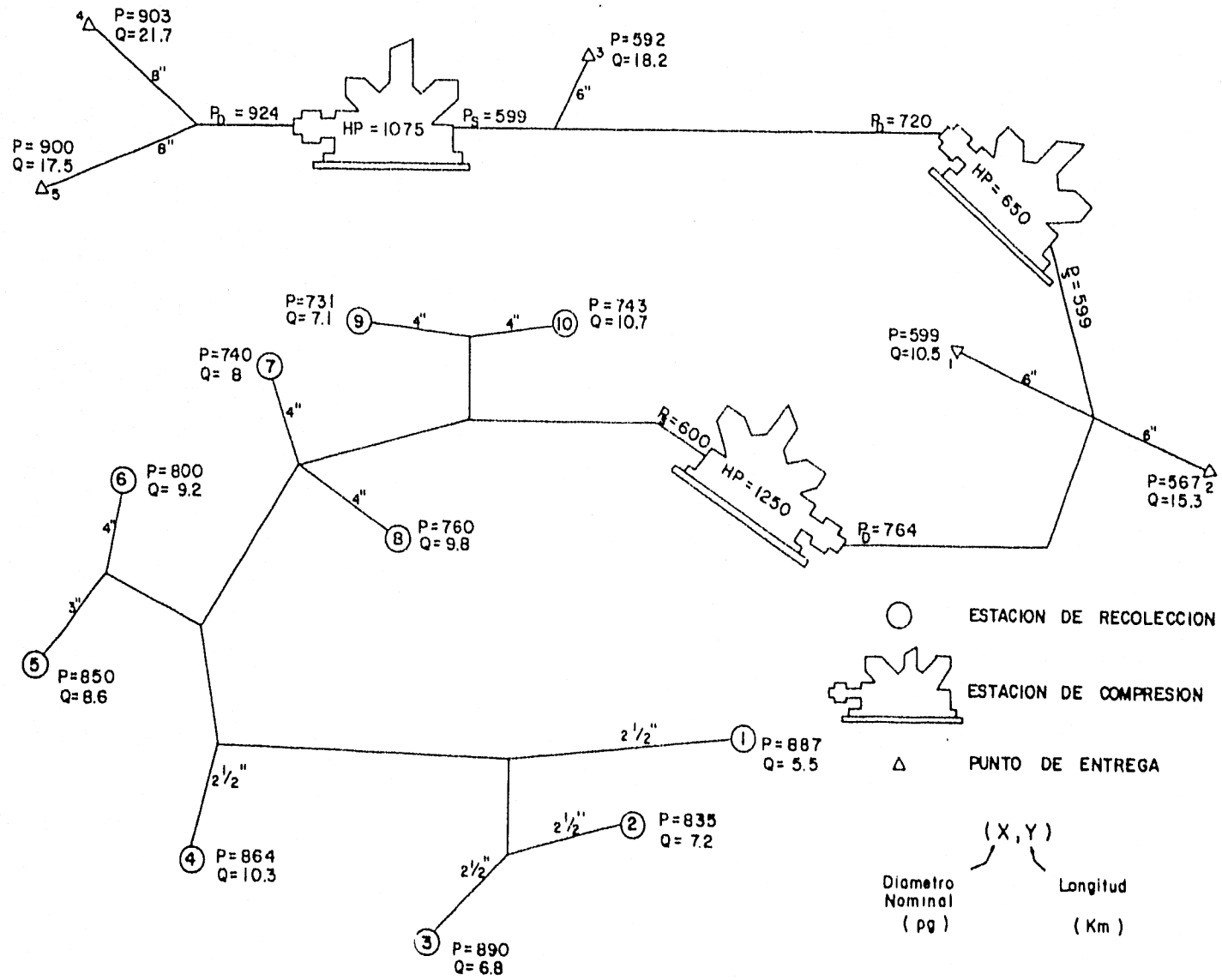


Fig.10.- Resultados del Sistema Ejemplo con el Programa Modificado

propuesto no toma como base los diámetros que se le dan, sino que con ellos em-  
pieza un procedimiento iterativo hasta encontrar la solución.

Los dos diseños encontrados satisfacen las condiciones de operación  
establecidas, para saber cuál de los diseños se debe escoger, se efectúa -  
un análisis económico de la alternativa.

Como el objeto de este trabajo no incluye el análisis económico  
de los diseños, aquí no se presenta nada al respecto , sin embargo, es un as-  
pecto muy importante por lo que debe tomarse en cuenta para la selección final del  
diseño; además es conveniente realizar un mayor número de opciones de diseño con  
el fin de seleccionar la más adecuada.

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El programa de cómputo propuesto en este trabajo permite realizar la ingeniería básica del diseño y análisis de redes de transporte de gas por tuberías con una disminución en el costo de computación y en las horas/hombre en comparación con el programa original. Sin embargo, se recomienda seguir trabajando con el programa en más sistemas de redes para establecer su rango de aplicación.

La disminución en costo y tiempo redundará en la posibilidad de analizar un mayor número de opciones de diseño, lográndose con esto una mejor selección de diseño.

El programa fue realizado con el fin de utilizarse en redes de gas, no obstante, es posible tomar como base la mayoría de las subrutinas y parte del programa principal para efectuar lo mismo a uno referente al diseño y análisis de redes de agua o aceite.

Debido a que con esta nueva versión del programa hay mayor libertad de fijar datos y mayor versatilidad en fijar incógnitas, debe tenerse más cuidado en la manera de establecer lo anterior, pues hay mayor posibilidad de equivocación al tratar de que el programa calcule sistemas irreales. Por lo que si al usar el programa, se encuentran errores, deben observarse los datos que se fijaron y revisarse si es lógica la información que se proporciona al programa.

Es conveniente hacer notar que el programa propuesto en este trabajo no efectúa el diseño óptimo de una red de gas, sino que solamente permite hacer una mejor selección que con el programa original. Sin embargo, un programa de optimización puede hacerse tomando como base este programa, incluyéndole el aspecto económico y algún método de optimización, la literatura presenta algunos métodos. (17) (18)

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

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

## REFERENCIAS

- 1.- Stoner, M. A.: "A New Way to Design Natural Gas Systems; Pipe Line Industry, febrero de 1970, pp. 38-42.
- 2.- Stoner, M. A.: "Sensitivity Analysis Applied to a Steady-State Model of - Natural Gas Transportation Systems"; Society of Petroleum Engineers Journal, abril de 1972, pp. 115-125.
- 3.- Limón H., T.: "Transporte de Gas en Régimen Permanente"; Instituto Mexicano del Petróleo, Publicación No. 74BH/164, julio de 1974.
- 4.- Sánchez A. F.; Pazmiño U., 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 de 1979.
- 5.- Sánchez 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, mayo de 1980.
- 6.- Shamir, U y Howard, C.D.D.: "Water Distribution Systems Analysis"; Journal of Hydraulics Div., ASCE, enero de 1968, No. H Y 1, pp. 219 - 234.

- 7.- De Neufville, R. y Hester. J.: Discusión del artículo "Water Distribution Systems Analysis"; Journal of Hydraulics Div., ASCE, enero de 1969, No. - HY1, p. 484.
- 8.- Ortega, J. M. y Rheinboldt, W.C.: " Iterative Solutions of Nonlinear Equations in Several Variables ", Academic Press, 1970.
- 9.- Chang, A.: " Application of Sparse Matrix Methods in Electric Power System Analysis ", Proceedings of Sparse Matrix Symposium, York Town Heights, New York, septiembre de 1968, pp. 113 - 122.
- 10.- Sato, N. y Tinney, W. F.: " Techniques for Exploiting the Sparsity of the Network Admittance Matrix "; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, diciembre de 1963, pp. 944 -950.
- 11.- Tinney, W F, y Walker, J. W.: " Direct Solutions of Sparse Network Equa---tions by Optimally Ordered Triangular Factorization "; Proceedings of the IEEE, vol. 55, No. 11, noviembre de 1967, pp. 1801 - 1809.
- 12.- Ogbuobiri, E.C.; Tinney, W. F. y Walker, J. W.: "Sparsity-Directed Decom---position for Gaussian Elimination on Matrices "; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. pas- 89, No. 1, enero de 1970, pp. 141 - 150.
- 13.- Conte, S. D. y Boar, C.: " Análisis Numérico Elemental "; Mc, Graw-Hill, - 1974.

- 14.- Brill, J. P. y Beggs, H.D.: " Two-Phase Flow in Pipes; Universidad de Tulsa, 1978, p. 4 - 58.
- 15.- Campbell, J. M.: " Gas Conditioning and Processing " John M. Campbell, E.U.A., 1970.
- 16.- " Nippon Steel Line Pipe ", Nippon Steel Corporation, octubre de 1975.
- 17.- Flanigan, O.: " Constrained Derivatives in Natural Gas Pipeline System - Optimization "; Journal of Petroleum Technology, mayo de 1972, pp. 549-556.
- 18.- Martch, H.B. y Mc. Call, N. J.; " Optimization of the Design and Operation of Natural Gas Pipeline Systems " SPE 4006, 1972.
- 19.- Limón H., T.: Reporte Interno, IMP,