

01162

3
2ij



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

ANALISIS DE REDES DE AGUA POTABLE

T E S I S

PRESENTADA POR:

MINERVA GAMBOA SANCHEZ

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA

(HIDRAULICA)

DIRIGIDA POR:

DR. CARLOS ESCALANTE SANDOVAL

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Ciudad Universitaria

Junio 1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

CONTENIDO

I. INTRODUCCION	3
1.1 ANTECEDENTES	5
II. FLUJO A PRESION EN REGIMEN PERMANENTE	
2.1 METODO DE LA TEORIA LINEAL	12
2.2 METODO DEL ELEMENTO FINITO.	15
2.3 METODO UTILIZANDO SERIE DE TAYLOR MODIFICADA.	20
2.4 METODO DE HARDY CROSS.	26
2.5 METODO POR CORRECCION DE CARGAS.	35
III FUNCIONAMIENTO HIDRAULICO A PRESION EN REGIMEN NO PERMANENTE.	40
3.1 METODO DE LAS CARACTERISTICAS.	58
3.2 METODO DE DIFERENCIAS FINITAS.	61
3.3 METODO HIBRIDO.	64
3.4 METODO TRASMITANCIA HIDRAULICA	67
IV EJEMPLOS DE APLICACION	71
V. COMPARACION DE RESULTADOS DE LOS METODOS PARA REGIMEN PERMANENTE	79
VI. CONCLUSIONES	92
6.1 REFERENCIAS	97
6.2 APENDICE. LISTADO DE PROGRAMAS PARA METODOS A REGIMEN PERMANENTE	100

I. INTRODUCCION

La distribución de agua potable se realiza mediante redes de tuberías, conjunto de tuberías dispuestas una tras otra formando una figura cerrada, dentro de la cual un fluido puede volver a su punto de partida y después de recorrer todos sus componentes se le llama circuito.

Se llama nudo al punto que señala la unión de dos o mas tuberías o bien al extremo de un tubo no conectado a otro.

Las redes de tuberías son cerradas cuando los conductos están conectados de modo tal que se presenta por lo menos un circuito, y son abiertas cuando las tuberías están unidas sin formar ningún circuito.

En el funcionamiento hidráulico de la red, generalmente, interesa determinar las cargas en los extremos de sus tubos y los gastos que fluyen en los mismos.

En una red de tubos con flujo permanente donde se conoce al menos una carga y los gastos que entran o salen de la red, es posible calcular las cargas o los gastos en toda la red.

El primer método para el análisis sistemático de una red se debe a Hardy Cross, con este método, los valores iniciales de los gastos se corrigen utilizando la ecuación de la energía, para el balance de pérdidas a través de circuitos

Un método similar fue propuesto por Cornish, quien ajusta las elevaciones piezométricas en los nudos en lugar de ajustar los caudales. Ambos métodos pueden aplicarse haciendo uso de una computadora.

Este trabajo se enfoca principalmente a los métodos numéricos, más comúnmente usados, en flujos a presión en régimen permanente en un sistema de tuberías y se presenta una breve revisión de los métodos numéricos para el análisis del flujo no permanente. Los métodos revisados para flujo no permanente se

basan en la solución numérica de las ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas cuasi-lineales que describen el flujo no permanente en sistemas de tuberías. Se comparan las principales propiedades y ventajas relativas de los métodos de las características, diferencias finitas, elementos finitos y esquemas híbridos.

Se presenta la derivación, implantación y aplicación de un algoritmo híbrido original, desarrollado para la solución numérica de las ecuaciones que describen el flujo no permanente en sistemas de tuberías, donde se combinan eficientemente el método de las características y un algoritmo de diferencias finitas implícitas (método de los cuatro puntos).

Se propone un método para simular el funcionamiento hidráulico a presión en régimen no permanente de una red de tuberías. El método es aplicable a redes de agua potable donde los gastos de demanda son variables en el tiempo. Se considera que la red es abastecida por tanques de almacenamiento y bombas y que el gasto suministrado a los usuarios es tomado de almacenamientos que son alimentados por la red. Se incluye la descripción y desarrollo del método.

Se presenta un resumen de un nuevo método de análisis de redes de tuberías, conocido como el Método de la Matriz de Trasmittancia Hidráulica el cual simplifica los algoritmos reduciendo la longitud de los programas, el tiempo de ejecución y los consumos de memoria. Los vectores y matrices no se calculan por medio de operaciones matriciales sino ensamblando propiedades de los elementos de una forma muy similar a la utilizada en el método de la rigidez para el análisis estructural.

El desarrollo de este trabajo, se ha dividido en 6 capítulos, siendo el primero de ellos la introducción y los antecedentes, donde se plantean los objetivos que se persiguen.

El segundo capítulo describe los métodos numéricos utilizados en flujos a presión en régimen permanente, siendo el primer método el basado en la teoría lineal, el cual trabaja un número de ecuaciones igual al número de elementos de la red y el balance de masa se satisface permanentemente. El comportamiento no lineal de

los elementos se tiene en cuenta dos veces en el sistema de ecuaciones, siempre y cuando pertenezcan a dos circuitos o trayectorias; el segundo método es el basado en el elemento finito, el cual usa las propiedades básicas de cada elemento discreto para definir su comportamiento; el tercero parte de encontrar una relación entre los valores de las variables, ya sean gastos o cargas piezométricas, esto se logra desarrollando en serie de Taylor las ecuaciones de pérdida de carga en los tramos de la red y despreciando los términos de orden superior al segundo; el cuarto es el método de Cross; con este método, los valores iniciales de los gastos se corrigen utilizando la ecuación de la energía, para el balance de pérdidas a través de circuitos elementales. el quinto método es por corrección de cargas, propuesto por Cornish, quien ajusta las elevaciones piezométricas en los nudos en lugar de ajustar los caudales.

En tercer capítulo se presenta el breve resumen de los métodos existentes para redes de tuberías con flujo no permanente, tales como el método de las características, de diferencias finitas y el híbrido.

El cuarto capítulo, describe dos ejemplos de aplicación en redes con flujo permanente.

En el quinto capítulo se presenta la comparación de resultados y por último se dan las conclusiones y un apéndice con el listado de los programas.

1.1 ANTECEDENTES

Para encontrar las cargas y los gastos se emplean dos tipos de ecuaciones: la de nudo y la de pérdida de energía. Se conocen las características físicas de la red y de los elementos que la componen, así como una serie de condiciones de frontera (como son por ejemplo los gastos de alimentación o niveles piezométricos en tanques de almacenamiento y regulación).⁷

CASO DE UNA TUBERIA.

En la figura 1 se muestra un tubo casi horizontal de longitud L. Al aplicar la ecuación de la energía entre dos secciones cualesquiera s e i, se tiene

$$Z_s + \frac{P_s}{\gamma} + \frac{\alpha_s V_s^2}{2g} = Z_i + \frac{P_i}{\gamma} + \frac{\alpha_i V_i^2}{2g} + h_f \quad (1)$$

donde Z, P, y V representan la elevación, la presión y la velocidad media en el centro de la sección y α el coeficiente de Coriolis. Además γ y g son el peso específico del agua y la aceleración de la gravedad respectivamente, y h_f es la pérdida de carga. Los subíndices s e i indican de que sección se trata.

Haciendo

$$h_s = Z_s + \frac{P_s}{\gamma} \quad (2)$$

$$h_i = Z_i + \frac{P_i}{\gamma}$$

donde h_s y h_i se llaman carga piezométrica en la sección s e i, respectivamente, para una tubería con área de sección transversal constante, por continuidad $V_s = V_i$ y aceptando que $\alpha_s = \alpha_i = 1$ la ecuación 1 queda como

$$h_s = h_i + h_f \quad (3)$$

De acuerdo con esta expresión, la pérdida de carga es igual a la caída de carga que tiene lugar en la tubería entre las secciones s e i.

$$h_f = h_s - h_i \quad (4)$$

la pérdida de carga que se origina durante el escurrimiento de un fluido a través de una tubería depende de su velocidad v , el diámetro D , la longitud L , la rugosidad o aspereza de la tubería, así como de la densidad ρ y viscosidad μ del fluido.

Al respecto se han propuesto varias fórmulas que permiten valuarla, de las expresiones más empleadas, es posible escribir

$$h_f = C[Q^{m-1}] Q \quad (5)$$

donde C depende de los parámetros antes citados, m es una constante cuyo valor se asigna de acuerdo a la expresión de pérdida de carga y Q es el gasto que fluye por la tubería.

ECUACION DE NUDO.

Se debe satisfacer la ecuación de continuidad

$$\sum Q = 0 \quad (6)$$

$$\sum Q_{ij} + q_i = 0 \text{ para } i=1, \dots, n \quad (7)$$

donde

Q_{ij} gasto que va del nudo j al nudo i

q_i gasto que sale o entra al nudo i

el símbolo j e i se lee: "para todos los nudos j conectados al i a través de un tubo".

TABLA 1. Expresiones muy usadas para calcular C y asignar m .

FORMULA	COEF. DE RUGOSIDAD	C	m
Darcy-Weisbach	f	$0.0826fL/D^5$	2
Manning	n	$10.293 nL/D$	2
Hazen Williams	C_H	$L/(0.279C_H D^{2.63})^{1.851}$	1.851

La ecuación dinámica y de continuidad (ver capítulo III) describen los flujos en estado transitorio. Estas ecuaciones forman un arreglo de ecuaciones diferenciales parciales de primer orden con dos variables independientes: distancia, x , y tiempo, t , y dos variables dependientes: el gasto, Q , y la carga piezométrica. Las otras variables tal como diámetro, D , velocidad de onda, a , y el factor de fricción de Darcy-Weisbach, f , son características del sistema de tuberías.

A partir de esto, los términos no lineales de estas ecuaciones envuelven solamente la primera potencia de la derivada, es decir son de primer orden, y son conocidas como cuasi-lineales. Estas ecuaciones diferenciales parciales son del tipo hiperbólico.

Por la presencia de estos términos no lineales, la solución de estas ecuaciones, no es muy conocida. Varios procedimientos gráficos y analíticos fueron desarrollados en el pasado para resolver estas ecuaciones. Estos métodos son aproximados y no pueden ser usados para analizar sistemas largos y complejos. Recientemente un gran número de métodos numéricos apropiados para analizar en computadoras, han sido reportados para resolver estas ecuaciones sin linealizar los términos no lineales.

En este trabajo, se mencionan varios métodos numéricos apropiados para resolver las ecuaciones dinámica y de continuidad y se discuten las ventajas y desventajas de cada uno de ellos. Se presenta a detalle uno de estos métodos - el de las características- el cual es ampliamente usado para resolver ecuaciones diferenciales hiperbólicas.

La solución cerrada consiste en una ecuación algebraica en términos de las variables independientes, puede ser obtenida para cualquier valor dado de ellas.

En una solución numérica, sin embargo, las soluciones son obtenidas solamente en los puntos discretos. Por ejemplo, en un flujo no permanente uni-dimensional en una tubería, existen 2 variables dependientes H y Q , y dos independientes, x y t .

En una solución de forma cerrada Q y H son expresados en términos de x y t, y por lo tanto el valor de ellas pueden ser determinados de estas expresiones para cualquier valor dado de x y t.

En los métodos numéricos, sin embargo, los valores de Q y H son obtenidos solamente para puntos discretos en el plano x-t, para cantidades finitas de distancia, Δx y tiempo, Δt .

Δt será referido como el intervalo de tiempo computacional y Δx como la parte de longitud en las cuales el tubo fue dividido.

En el método de diferencias finitas explícitas, la forma característica de las ecuaciones dinámica y de continuidad es usada para plantear condiciones de frontera.

En resumen, el método explícito de diferencias finitas es empleado usualmente para resolver las ecuaciones diferenciales ordinarias obteniendo para su uso el método de las características. Por lo tanto, comparar las ventajas y desventajas de estos métodos disponibles, sería suficiente comparar el método implícito y el método de las características.

En el método implícito de diferencias finitas, las ecuaciones algebraicas resultantes para todo el sistema son resueltas simultáneamente.

Debido a que el término de fricción en esta ecuación es no lineal, se requiere una solución de un número más grande de ecuaciones algebraicas no lineales, dependiendo del número de divisiones en la cual el sistema de tubos es considerado para propósitos de análisis.

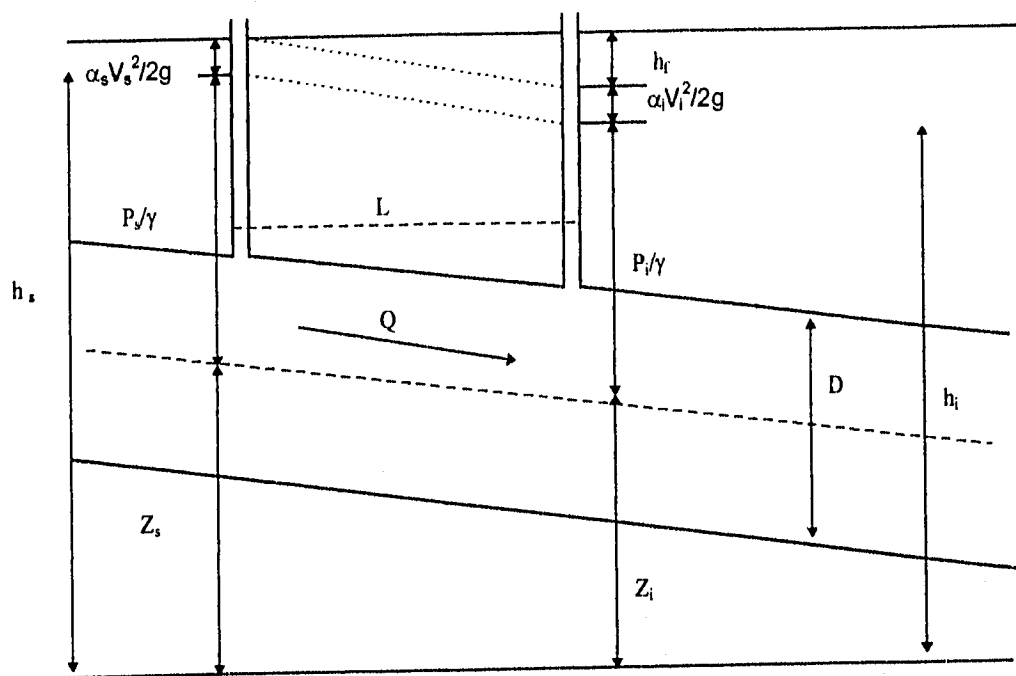
Por lo tanto, el sistema de análisis tiene condiciones de frontera complejas, necesitando procedimientos iterativos los cuales requerirán largo tiempo de computadora, para cada iteración. La principal ventaja del método es que no tiene restricciones, estas son impuestas por un intervalo de tiempo para que el esquema sea estable. Sin embargo el intervalo de tiempo no podrá ser incrementado arbitrariamente para evitar la violación de la validez del reemplazo de

las derivadas parciales por las citadas diferencias finitas. A raíz de estas limitaciones, el método no es muy popular para el análisis de conductos cerrados con flujo no permanente.

En el método de las características, cada límite y cada sección del conducto son analizados separadamente durante un lapso de tiempo. Por lo tanto, el método es, particularmente, apropiado para el análisis de sistemas, teniendo condiciones de frontera complejas.

La principal desventaja de el método, es la restricción de condiciones de estabilidad y la medida del lapso de tiempo. En resumen, las interpolaciones pueden ser necesarias para usar este método y analizar sistemas teniendo más de un tramo de tubería, estas interpolaciones causan dispersión numérica y atenuación.

FIGURA 1. CARGA EN LOS EXTREMOS DEL TUBO



II. METODOS NUMERICOS

2.1 METODO DE LA TEORIA LINEAL

Este método es usado para redes en las cuales los flujos externos son conocidos.

La relación entre pérdidas de carga y velocidad en una tubería está expresada por la ecuación de Darcy-Weisbach.

$$h_f = CQ^2 \quad (8)$$

$$H_i - H_j = (Q_{ij} | Q_{ij} |) k_{ij} \quad (9)$$

en la cual

$$k_{ij} = \frac{8fL_{ij}}{\pi g D^5} \quad (10)$$

Q_{ij} es positivo si $H_i > H_j$. Es decir que el flujo es de i a j.

El flujo en cada tubo puede ser expresado en términos de las cargas de los nudos

$$Q_{ij} = C_{ij} (H_i - H_j) / |H_i - H_j|^{1/2} \quad (11)$$

$$C_{ij} = \frac{1}{k_{ij} |Q_{ij}|} \quad (11a)$$

La ecuación de continuidad del nudo j es

$$\sum Q_{ij} - Q_j = 0 \quad (12)$$

Los flujos de la sumatoria son positivos si van hacia el nudo j

Q_j es el flujo externo (positivo si sale del nudo).

La suposición básica es que si una solución aproximada para las cargas H^n , y el flujo del tubo es conocido, después de n iteraciones entonces la ecuación 5 puede ser linealizada por la aproximación

$$Q^{n+1} - Q^n = C^n (H^{n+1} - H^n) \quad (13)$$

así

$$Q^{n+1} = k^n (H^{n+1} - H^n) \quad (14)$$

en la cual

$$k^n = C^n / Q^n \quad (15)$$

Entonces la ecuación 9 es sustituida dentro de la ecuación de continuidad del nudo j (ec. 7), esto es

$$\Sigma(k^n H^{n+1}) - (\Sigma k^n) H^{n+1} = Q_j \quad (16)$$

La ecuación 11 puede ser rearmada para ser utilizada por el método de Gauss-Seidel:

$$\begin{aligned} \Sigma Q_{ij} = q_j &= \Sigma C_{ij} h_{ij} = q_j \\ \Sigma(C_{ij} H_i - C_{ij} H_j) &= q_j \\ H_j &= \frac{\Sigma C_{ij} H_i - q_j}{\Sigma C_{ij}} \end{aligned} \quad (17)$$

donde $\Sigma(CH)$ y ΣC están acumuladas en 2 sitios y solo estos tubos con j como uno de sus nudos son procesados. Cuando las cargas son conocidas, como por ejemplo, un depósito, H es un valor específico. La eficiencia de este método puede ser incrementado grandemente si se usa el método de sobre relajación sucesiva (SOR); estas ecuaciones también pueden resolverse por otras técnicas tales como el método de eliminación gaussiana o el método iterativo de Gauss Seidel.

CARACTERISTICAS DEL METODO

El método es extremadamente simple para aplicar en un programa de computadora, este resuelve las cargas desconocidas y sin embargo requiere pocas ecuaciones, las ecuaciones lineales pueden ser resueltas por el método SOR, esto permite un uso eficiente de espacio de almacenamiento y no tiene restricciones de ancho de banda. El esquema iterativo se inicia fácilmente, todos los métodos numéricos para análisis de redes de tubería usan procedimientos iterativos y la exactitud de la solución depende de la tolerancia adoptada y de la precisión de la computación numérica. En este método la solución final satisface la continuidad exactamente y

cualquier error puede ser interpretado en términos de pérdidas de fricción.

Inicialización:

El método requiere una estimación inicial del valor absoluto del gasto en cada tubería, el valor puede ser el mismo para todas las tuberías, se recomienda usar los valores de $0.001 \text{ m}^3/\text{s}$ a $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$.

Factor de fricción.

Si el factor de fricción no es considerado como una constante, la rugosidad relativa de cada tubería debe ser especificada y f puede ser calculada a partir del gasto aproximado al empezar cada iteración.

Si el gasto en una tubería tiende a cero, los errores numéricos pueden surgir por la cercanía a un gasto cero, puede producir valores extremadamente grandes para k_{ij} de la ecuac. 11. Del valor de k_{ij} depende que C_{ij} sea tan bueno como Q_{ij} , esto es mejor en cualquier prueba para las condiciones de diferencias de cargas. Cuando $H_i - H_j$ tiende a cero, la tubería debe ser removida de la red.

El método no puede ser garantizado para toda una configuración de una red, especialmente cuando varios depósitos y aparatos son incluidos. Si el error numérico afecta la satisfacción de la continuidad y la exactitud de la solución completa, tal error, ΔQ_j , en la continuidad de cada nudo, j , es calcular para la solución final. así

$$\Delta Q_j = \sum Q_{ij} - q_j \quad (18)$$

En la cual la sumatoria es tomada para todas las i conectadas por un tubo a j . Note que si la carga es fija $q_j = \sum Q_{ij}$ y la misma codificación puede ser usada por q_j cuando H es fija como por ΔQ_j a otros nudos.

Los datos requeridos para cada tubería son los dos números de los nudos que la unen, longitud, diámetro, factor de fricción o rugosidad relativa, para los nudos los datos son cualquiera de los dos valores conocidos de q_j o los valores conocidos de H . Otro dato es la tolerancia y el número máximo permitido para las iteraciones principales y para las iteraciones del SOR.

Para evitar desbordamientos se introduce en el programa el siguiente paso $H_j = w H_{j1} + (1-w) H_{j0}$

donde

$0 \leq w \leq 1$ y el subíndice 0 se refiere al valor previo o anterior de H_j y 1 al valor reciente de H_j .

2.2 METODO DEL ELEMENTO FINITO¹⁵

Este método usa la relación entre las propiedades básicas de cada elemento discreto para definir su comportamiento; en cuanto a redes de distribución estas propiedades básicas son la ecuación de continuidad (en cada nudo) y la condición de cumplir con la suma de pérdidas de carga igual a cero (en cada circuito).

Para la aplicación del método en redes se deben cumplir ciertas condiciones:

1. La suma algebraica de los flujos en cualquier nudo debe ser cero.
2. El valor de la carga piezométrica en un nudo es el mismo para todas las tuberías conectadas a éste.
3. La relación gasto-pérdida de carga debe satisfacerse para cada elemento o tubo.

Se requiere una relación lineal para definir el tubo, por lo que se asume una relación de la forma:

$$Q_{ij} = C_{ij} h_{ij} \quad (19a)$$

entre el flujo Q , la pérdida de carga h y las propiedades hidráulicas del tubo C .

Las pérdidas de carga h en la ecuación 19, es la diferencia entre las cargas piezométricas h de los nudos en cada extremo del tubo que contribuye a la suma de los flujos Q en el nudo. La matriz del sistema de tubos se forma aplicando la ecuación de continuidad en cada nudo ($\sum Q = 0$). Alternativamente, si se especifica la carga piezométrica en algún nudo, la suma de los flujos queda implícitamente definida.

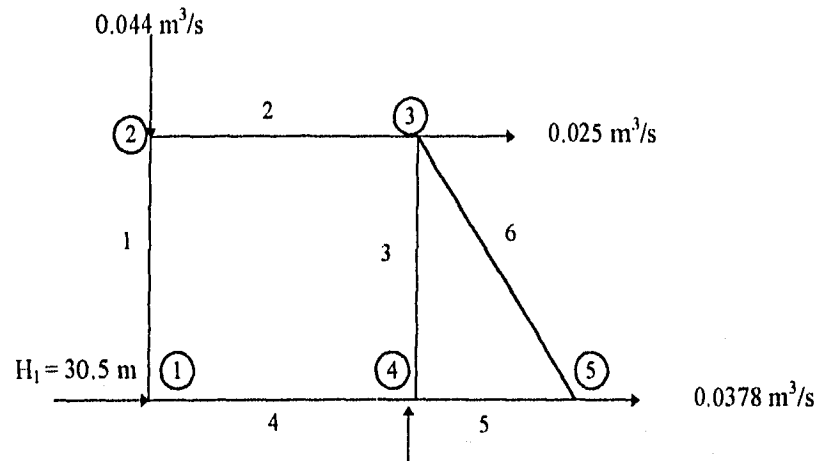
La matriz tiene la forma

$$Q = CH \quad (19b)$$

Cuando se da solución a la matriz, se obtienen las cargas piezométricas de dos nudos, que es la pérdida de carga, puede sustituirse en la ecuación 19 para calcular el gasto del tubo que une los dos nudos. La dirección del flujo se conserva automáticamente porque toma el signo de la diferencia de las cargas consideradas.

El elemento finito representa a la tubería en la forma más simple posible; cada elemento es unidimensional y tiene un grado de libertad en cada nudo. Para aplicar sucesivamente la suma de los flujos debe adoptarse una convención de signos; un flujo que entra a un nudo se toma como negativo y positivo si sale.

El análisis de una red simple, como la de la figura siguiente, es usada para presentar la aplicación de este método.



Se tienen las siguientes ecuaciones:

$$q_1 = Q_1 + Q_4 \quad (\text{a})$$

$$q_2 = Q_1 + Q_2 \quad (\text{b})$$

$$q_3 = Q_3 + Q_2 + Q_6 \quad (\text{c})$$

$$q_4 = Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (\text{d})$$

$$q_5 = Q_5 + Q_6 \quad (\text{e})$$

Los flujos de las tuberías pueden ser expresados por la ecuación 19, haciendo notar que la pérdida de carga es igual a la diferencia de las cargas piezométricas de los nudos de cada tubo.

$$Q_1 = \pm C_1 (H_1 - H_2) \quad (\text{f})$$

$$Q_2 = \pm C_2 (H_2 - H_3) \quad (\text{g})$$

$$Q_3 = \pm C_3 (H_3 - H_4) \quad (h)$$

$$Q_4 = \pm C_4 (H_1 - H_4) \quad (i)$$

$$Q_5 = \pm C_5 (H_4 - H_5) \quad (j)$$

$$Q_6 = \pm C_6 (H_3 - H_5) \quad (k)$$

Ahora las ecuaciones a, b, c, d y e pueden ser escritas en términos de los coeficientes (C_1, C_2, C_3, \dots) y las cargas piezométricas (H_1, H_2, H_3, \dots)

$$q_1 = C_1 (H_1 - H_2) + C_4 (H_1 - H_4) \quad (l)$$

$$q_2 = C_1 (H_1 - H_2) + C_2 (H_2 - H_3) \quad (m)$$

$$q_3 = C_2 (H_3 - H_2) + C_3 (H_3 - H_4) + C_6 (H_3 - H_5) \quad (n)$$

$$q_4 = C_3 (H_4 - H_3) + C_4 (H_4 - H_1) + C_5 (H_4 - H_5) \quad (o)$$

$$q_5 = C_5 (H_5 - H_4) + C_6 (H_5 - H_3) \quad (p)$$

Las ecuaciones l, m, n, o y p pueden ser combinadas en la matriz de la forma siguiente

$$\begin{array}{c|c|c|c|c|c} q_1 & C_1 + C_4 & -C_1 & 0 & -C_4 & 0 \\ q_2 & -C_1 & C_1 + C_2 & -C_2 & 0 & 0 \\ q_3 & 0 & -C_2 & C_2 + C_3 + C_6 & -C_3 & -C_6 \\ q_4 & -C_4 & 0 & -C_3 & C_3 + C_4 & -C_5 \\ q_5 & 0 & 0 & -C_6 & -C_5 & C_5 + C_6 \end{array} \begin{array}{c} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ H_4 \\ H_5 \end{array}$$

Sustituyendo los valores de las condiciones de frontera, presentados en la figura ($H_1 = 30.5$ m, $q_2 = -0.044$, $q_3 = 0.025$, $q_4 = 0$ y $q_5 = 0.0378$), en el sistema de ecuaciones, arriba mencionado, se llega a la forma final para la solución.

Las incógnitas H_2, H_3, H_4, H_5 y q_1 , son obtenidas de la matriz, para después sustituirlas en las ecuaciones (f-k) y encontrar los gastos en cada tramo de la red.

DESCRIPCION DEL METODO:

1. Consiste en determinar un valor inicial del coeficiente "c" de los tubos (ec. 19) y formar la matriz de coeficientes de los tubos ($Q=CH$). Se considera la ecuación de Hazen-Williams

$$h = \frac{ML(q/C)^{1.85}}{D^{4.87}} \quad (20)$$

donde
 h pérdida de carga (m)
 M coeficiente de conversión de unidades
 L longitud del tubo (m)
 D diámetro del tubo (m)
 q gasto del tubo (m³/s)
 C coeficiente de rugosidad del tubo

se hace

$$h = k Q^{1.85}$$

Suponiendo un número de Reynolds $R = 2 \times 10^5$ (flujo turbulento) para todos los tubos, se calcula la velocidad asumiendo que se conoce la viscosidad dinámica del agua μ , esto es:

$$R = VD \rho / \mu$$

$$V = R \mu / \rho D$$

Con esta velocidad se calcula el gasto inicial en cada tubo:

$$q_1 = 200000 A \mu / D$$

siendo, A el área hidráulica del tubo, en m².

Con el coeficiente "K" y el gasto q_1 , se calcula la pérdida de carga " h_1 " en la ecuación no lineal de pérdida de carga (fórmulas de Hazen Williams o Darcy Weisbach)

$$h = k q^n \quad (21)$$

Los valores q_1 y h_1 se sustituyen en la ecuación 19 para obtener un coeficiente inicial c_1 :

$$c_1 = q_1 / h_1$$

Estos coeficientes se combinan para formar la matriz C de la ecuación $Q = CH$. Entonces se resuelve la ecuación matricial del sistema para que de la primera estimación de carga piezométrica en cada nudo.

2. Con las diferencias entre cargas piezométricas de los nudos, se calculan las pérdidas de carga h_2 en los tubos y con éstas se estiman los gastos q_2 , individuales de cada tubo, usando la ecuación 1, siendo: $c=c_1$. Entonces estos gastos q_2 se sustituyen en la ecuación 20, y como se conoce k , se calculan las pérdidas de carga h'_2 .

Si las pérdidas de carga resultantes corresponden a las obtenidas a partir de la solución matricial, entonces se ha encontrado una solución única que satisface ambas condiciones (ec. 19 y 20), esto es:

$$h'_2 = h_2$$

3. Consiste en cambiar el valor "c" para que el problema converja a una solución, si hay diferencia entre las pérdidas calculadas por la ecuación 20 y la solución matricial, esto es:

$$h'_2 \neq h_2$$

Para obtener una nueva corrección de "c" para cada tubo, se sustituyen los valores " q_2 " y h'_2 en la ecuación 19:

$$c_2 = q_2 / h'_2$$

Con el valor de los coeficientes " c_2 " se vuelve a formar y resolver la matriz C.

Cuando todos los coeficientes de los tubos han sido corregidos en forma similar, obviamente se ha alterado la distribución de los gastos y el sistema está modificado cuando la matriz se resuelve.

Para compensar esa modificación, se introduce una técnica de promedio, se toma como valor correcto de "c", c'_2 que es la media del valor " c_2 " y el inicial " c_1 ".

Se continúa así hasta que se cumpla que $h'_2 = h_2$.

2.3 METODO UTILIZANDO SERIE DE TAYLOR MODIFICADA

ANALISIS PARA UNA RED DE TUBOS ⁷

Considerese la red de la fig. 2 donde se conoce la carga en los nudos 1, 2, 3, 4 y 5. En ella se han enumerado los nudos y las tuberías, distinguiendo a estas ultimas con números encerrados en un círculo. También aparece con flecha el gasto que sale de la red en el nudo 5 y los gastos (Q) que escurren en las tuberías, para esto se ha supuesto el sentido de flujo.

Al aplicar la ecuación de continuidad para cada uno de los nudos del 1 al 5 se llega al siguiente sistema de ecuaciones No. 22

$$\begin{aligned}
 Q_6 - Q_1 - Q_2 - Q_4 &= q_1 \\
 Q_7 + Q_1 - Q_3 &= q_2 \\
 Q_3 + Q_2 - Q_5 &= q_3 \\
 Q_4 + Q_8 + Q_9 &= q_4 \\
 Q_5 + Q_{10} + Q_{11} &= q_5
 \end{aligned} \tag{22}$$

En forma general, el sistema de ecuaciones se puede escribir como

$$\sum Q_j = q_n \tag{23}$$

donde la suma se hace para todos los tubos j conectados al nudo n. Al expresar los gastos Q_1 a Q_{11} en función de las cargas mediante la ecuación

$$Q = R(h_s - h_i)^{1/m} \tag{24}$$

donde

$$R = (1/C)^{1/m} \tag{25}$$

y después de sustituirlos en las ecs 22 se llega al sistema de ecuaciones 26

$$\begin{aligned}
 k_6(h_6 - h_1)^{1/m} - k_1(h_1 - h_2)^{1/m} - k_2(h_1 - h_3)^{1/m} - k_4(h_1 - h_4)^{1/m} &= q_1 \\
 k_7(h_7 - h_2)^{1/m} - k_1(h_1 - h_2)^{1/m} - k_3(h_2 - h_3)^{1/m} &= q_2 \\
 k_3(h_2 - h_3)^{1/m} + k_2(h_1 - h_3)^{1/m} - k_5(h_3 - h_5)^{1/m} &= q_3 \\
 k_4(h_1 - h_4)^{1/m} + k_8(h_8 - h_4)^{1/m} + k_9(h_9 - h_4)^{1/m} &= q_4 \\
 k_5(h_3 - h_5)^{1/m} + k_{10}(h_{11} - h_5)^{1/m} + k_{11}(h_{10} - h_5)^{1/m} &= q_5
 \end{aligned} \tag{26}$$

Como $m > 1$ se trata de un sistema de ecuaciones no lineales que tiene como incógnitas a h_1, h_2, h_3, h_4 y h_5 . En el nudo 6, 7, 8, 9, 10 y 11 la carga es conocida y sirve como nivel de referencia para las demás.

También es posible escribir a las ecuaciones 26 de un modo general como

$$\sum_j F(h) = q_n \quad (27)$$

donde la suma se efectúa para todos los tubos j conectados al nudo n y $F(h)$ es una función no lineal de las cargas en los extremos del tubo j definida con la ecuación 24.

La solución a la red consiste en encontrar el valor de las cargas h que satisfacen simultáneamente el sistema de ecuaciones no lineales dado por la ecuación 27

Sea $f(Q)$ una función que se desea representar en la forma:

$$f(Q) = a_0 + a_1(Q-a) + a_2(Q-a)^2 + \dots + a_n(Q-a)^n \quad (28)$$

Para obtener los coeficientes a se puede proceder de la manera siguiente:

Haciendo en la ecuación 28, $Q=a$, se obtiene $a=f(a)$, que es el primer coeficiente. Para obtener los restantes se toman las derivadas sucesivas de la ecuación 29.

$$\begin{aligned} f'(Q) &= a + 2a_2(Q-a) + 3a_3(Q-a)^2 + 4a_4(Q-a)^3 + \dots \\ f''(Q) &= 2a_2 + 2 \cdot 3a_3(Q-a) + 3 \cdot 4a_4(Q-a)^2 + \dots \\ f'''(Q) &= 2 \cdot 3a_3 + 2 \cdot 3 \cdot 4a_4(Q-a) + \dots \\ &\dots \\ f(Q) &= n! a_n + \dots \end{aligned} \quad (29)$$

Haciendo en estas expresiones $Q=a$ y despejando los coeficientes se obtiene

$$\begin{aligned} a &= f(a) \\ a &= f''(a)/2! \\ a &= f'''(a)/3! \\ a &= f^{(n)}(a)/n! \end{aligned}$$

Llevando estos resultados a la ecuación 29, se llega a la expresión siguiente:

$$f(Q) = f(a) + f'(a)(Q-a) + \frac{f''(a)(Q-a)^2}{2!} + \frac{f'''(a)(Q-a)^3}{3!} + \dots + \frac{f^n(a)(Q-a)^n}{n!} + \dots$$

conocida como desarrollo en serie de Taylor de la función $f(Q)$.

Para este caso de estudio utilizaremos la serie de Taylor de la función $f(Q)$ hasta la primera derivada, es decir,

$$f(Q + \Delta Q) = f(Q) + f'(Q) \Delta Q \quad (30)$$

Sea la función del gasto de la ecuación 5 de modo que

$$f(Q) = Cq^m = h_s - h_i \quad (31)$$

la derivada de $f(Q)$ respecto a Q es

$$f'(Q) = m C Q^{m-1} \quad (32)$$

si se considera que

$$Q = Q^k \quad (33)$$

$$\Delta Q = Q^{k+1} - Q^k \quad (34)$$

y también que

$$f(Q) = f(Q^k) = C (Q^k)^m \quad (35)$$

$$f'(Q) = f'(Q^k) = m C (Q^k)^{m-1} \quad (36)$$

donde k es un superíndice utilizado para indicar el valor de la literal en la iteración k .

Al tomar en cuenta las ecs 33 a 36 en la 30 se tiene

$$f(Q^{k+1}) = C (Q^k)^m + m C (Q^k)^{m-1} (Q^{k+1} - Q^k) \quad (37)$$

de donde

$$Q^{k+1} = \frac{f(Q^{k+1})}{C (Q^k)^{m-1}} + \frac{m-1}{m} Q^k \quad (38)$$

en términos del superíndice k, la ecuación 31 se puede escribir como

$$f(Q^{k+1}) = C (Q^{k+1})^m = h_s^{k+1} - h_i^{k+1} \quad (39)$$

cuando se sustituye la ecuación 39 en la 38 se encuentra

$$Q^{k+1} = \alpha^k (h_s^{k+1} - h_i^{k+1}) + \frac{m-1}{m} Q^k \quad (40)$$

siendo

$$\alpha^k = \frac{1}{mC (Q^k)^{m-1}} \quad (41)$$

La ecuación 40 es la expresión fundamental en el método, ya que se usan en lugar de la ec 24 que es no lineal. En efecto, si los gastos de las ecs 22 corresponden a la iteración k+1 y luego se sustituye en cada uno en la ecuación 40 se llega al sistema de ecuaciones 42.

$$\begin{aligned} (\alpha_1^k + \alpha_2^k + \alpha_4^k + \alpha_6^k) h_1^{k+1} - \alpha_1^k h_2^{k+1} - \alpha_2^k h_3^{k+1} - \alpha_4^k h_4^{k+1} &= q_1 + \alpha_6^k h_6^{k+1} + (-Q_6 + Q_1 + Q_2 + Q_4)(m-1)/m \\ -\alpha_1^k h_1^{k+1} + (\alpha_1^k + \alpha_3^k + \alpha_7^k) h_2^{k+1} - \alpha_3^k h_3^{k+1} &= q_2 + \alpha_7^k h_7^{k+1} + (-Q_7 - Q_1 + Q_3)(m-1)/m \\ -\alpha_2^k h_1^{k+1} - \alpha_3^k h_2^{k+1} + (\alpha_2^k + \alpha_3^k + \alpha_5^k) h_3^{k+1} - \alpha_5^k h_5^{k+1} &= q_3 + (-Q_3 - Q_2 + Q_5)(m-1)/m \\ -\alpha_4^k h_1^{k+1} + (\alpha_4^k + \alpha_8^k + \alpha_9^k) h_4^{k+1} &= q_4 + \alpha_8^k h_8^{k+1} + \alpha_9^k h_9^{k+1} + (-Q_4 - Q_8 - Q_9)(m-1)/m \\ -\alpha_5^k h_3^{k+1} + (\alpha_5^k + \alpha_{10}^k + \alpha_{11}^k) h_5^{k+1} &= q_5/2 + \alpha_{11}^k h_{11}^{k+1} + \alpha_{10}^k h_{11}^{k+1} + (-Q_5 - Q_{10-11})(m-1)/m \end{aligned} \quad (42)$$

En las ecuaciones anteriores se aprecia que, al no considerar los superíndices k, el término entre paréntesis del miembro derecho es precisamente q_n . Esto es, $Q_1 + Q_2 + Q_4 - Q_6$ es igual a $-q_1$ de acuerdo con la primera ecuación del sistema de ecuaciones 22.

Al tomar en cuenta esto el sistema de ecuaciones 42 se puede escribir como el sistema de ecuaciones 43.

$$\begin{aligned} (\alpha_1^k + \alpha_2^k + \alpha_4^k + \alpha_6^k) h_1^{k+1} - \alpha_1^k h_2^{k+1} - \alpha_2^k h_3^{k+1} - \alpha_4^k h_4^{k+1} &= \alpha_6^k h_6 \\ -\alpha_1^k h_1^{k+1} + (\alpha_1^k + \alpha_3^k + \alpha_7^k) h_2^{k+1} - \alpha_3^k h_3^{k+1} &= \alpha_7^k h_7 \\ -\alpha_2^k h_1^{k+1} - \alpha_3^k h_2^{k+1} + (\alpha_2^k + \alpha_3^k + \alpha_5^k) h_3^{k+1} - \alpha_5^k h_5^{k+1} &= 0 \\ -\alpha_4^k h_1^{k+1} + (\alpha_4^k + \alpha_8^k + \alpha_9^k) h_4^{k+1} &= \alpha_8^k h_8 + \alpha_9^k h_9 \\ -\alpha_5^k h_3^{k+1} + (\alpha_5^k + \alpha_{10}^k + \alpha_{11}^k) h_5^{k+1} &= q_5 + \alpha_{11}^k h_{11} + \alpha_{10}^k h_{11} \end{aligned} \quad (43)$$

En general, se afirma que se requiere resolver un sistema de ecuaciones lineales cuyas incógnitas son h^{k+1} , del tipo

$$[\alpha^k][h^{k+1}] = [q/m, \alpha h] \quad (44)$$

donde

α^k matriz de coeficientes del sistema de ecuaciones
 h^{k+1} vector de incógnitas
 $q/m, \alpha h$, vector columna de términos independientes

Si Q^k y h^k son conocidos se puede calcular α^k con la ecuación 41 y formar el sistema de ecuaciones lineales 44.

Luego al resolver este sistema, se encuentra h^{k+1} .

Con h^{k+1} , α^k y Q^k se calcula Q^{k+1} .

Cuando Q^k y Q^{k+1} son aproximadamente iguales se dice que se obtuvo la solución de la red con gastos Q^{k+1} y cargas h^{k+1} .

Si no es así, se asignan a las variables en la iteración k las de la iteración $k+1$ y se repite el proceso.

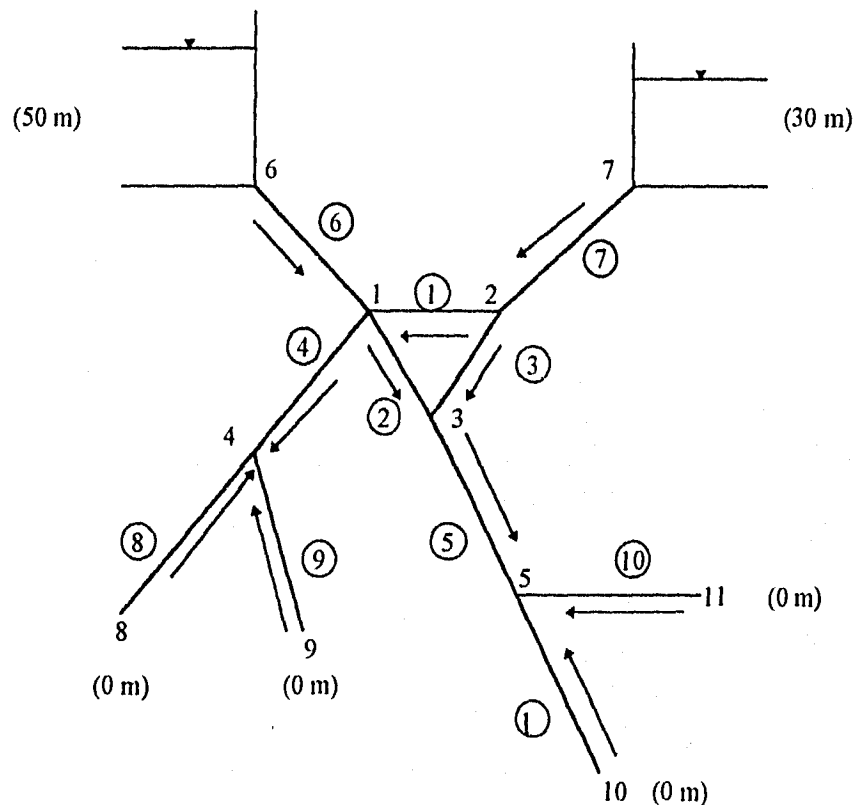
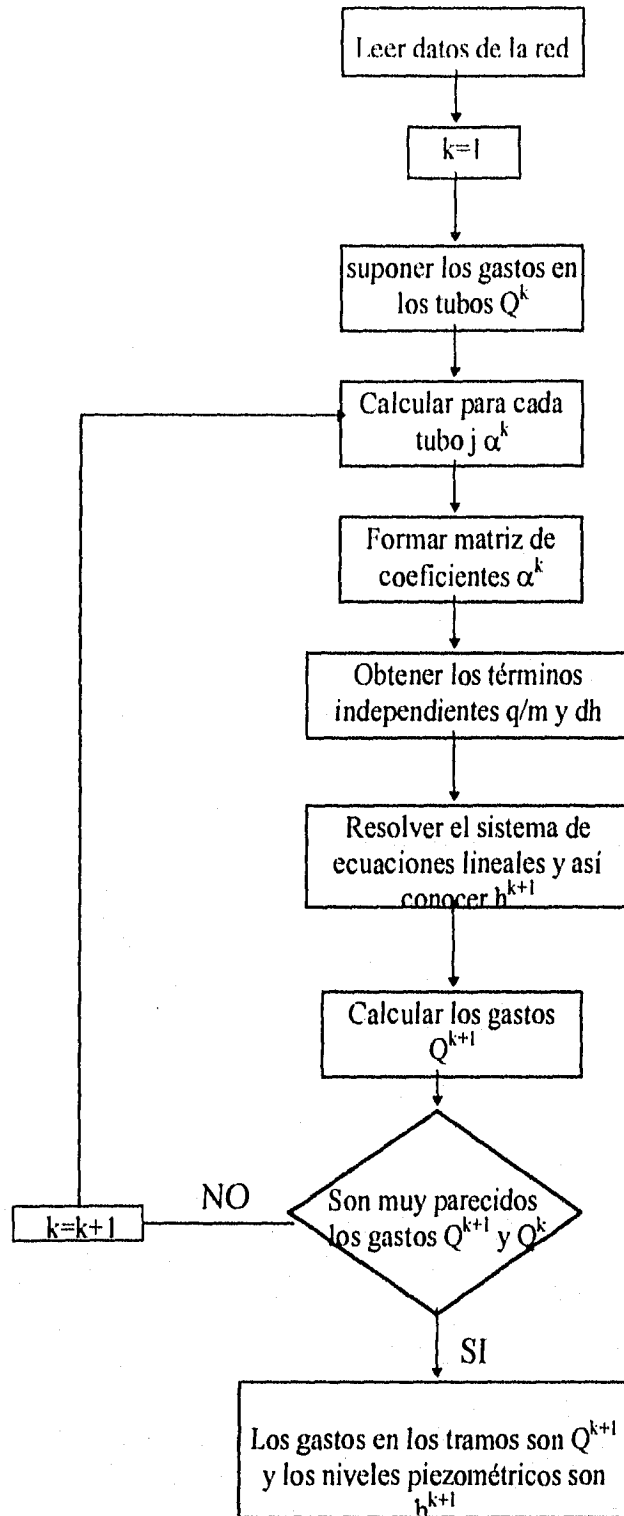


FIGURA 2. Todos los tubos tienen como longitud 500 m, diámetro 0.6 m y coeficiente de Manning 0.015. Del nudo 5 sale un gasto de $0.5 \text{ m}^3/\text{seg}$.

FIGURA 3
DIAGRAMA DE BLOQUES DEL METODO DE LA SERIE DE TAYLOR
MODIFICADA



2.4 METODO DE HARDY CROSS

En una red de tuberías, como la de la figura 4a, el principio de continuidad exigirá ⁵

$$1) \sum q_{\text{ingreso}} = \sum q_{\text{egreso}}, \text{ en toda la red}$$

$$2) \sum q_{\text{llegada}} = \sum q_{\text{salida}}, \text{ en cada nudo}$$

En el caso específico de la figura 4a, se tendría

$$q_3 + q_7 = \sum q_i$$

además, con la figura 4b

$$Q_2 = q_1 + Q_1$$

$$Q_1 + Q_4 = q_2$$

.

.

$$Q_{10} = q_8 + Q_9$$

Por otra parte, al establecer "circuitos", como los de la figura 5, una vez imaginados los "sentidos" de escurrimiento de los gastos Q_{ij} en las tuberías (fig 4b), los desniveles piezométricos debían ser congruentes; por ejemplo, en el circuito de la figura 5a se tendría, de acuerdo con la ecuación 8, que

$$k_{31} Q_{31}^2 + k_{12} Q_{12}^2 = k_{34} Q_{34}^2 + k_{42} Q_{42}^2 \quad (45)$$

De esta manera si se atribuye arbitrariamente un sentido positivo de recorrido a los gastos Q_{ij} (fig 5a), resultará

$$q_{31} = +$$

$$q_{34} = -$$

$$q_{12} = +$$

$$q_{42} = -$$

Esta consideración es consecuente con la ecuación 45 escrita en la forma 46, donde las dos primeras pérdidas de carga son positivas, y las otras negativas:

$$k_{31} Q_{31}^2 + k_{12} Q_{12}^2 - k_{34} Q_{34}^2 - k_{42} Q_{42}^2 = 0 \quad (46)$$

Además si se atribuyen signos a las k_{ij} iguales a los de sus correspondientes Q_{ij} , resulta que, en virtud de estos signos, también es congruente esta atribución con la ecuación 46, puesto que Q_{ij} aparece al cuadrado, la razón de que un término sea positivo o no, depende del signo k_{ij} ; ya que si hubiese necesidad de cambiar de signo a alguno de los terminos, por ejemplo a $k_{34}Q_{34}^2$, al cambiar el sentido de Q_{34} , se cambiaría el signo de k_{34} y con ello, al volverse Q_{34} positivo, $k_{34}Q_{34}^2$ también se volvería positivo.

Suponiendo que los gastos Q_{ij} satisficieran la ecuación 46 y se formaran, a partir de ellos y respetando sus signos, nuevos gastos Q_{ij}^* , obtenidos al sumar a cada uno de ellos cierto incremento ΔQ que introdujera un cierto error ε en el sistema, esto es

$$k_{31} (Q_{31}^*)^2 + k_{12} (Q_{12}^*)^2 - k_{34} (Q_{34}^*)^2 - k_{42} (Q_{42}^*)^2 = \varepsilon \quad (47)$$

Esta ecuación, de acuerdo con lo antes dicho, se puede escribir

$$k_{31} (Q_{31} + \Delta Q)^2 + k_{12} (Q_{12} + \Delta Q)^2 + k_{34} (Q_{34} + \Delta Q)^2 + k_{42} (Q_{42} + \Delta Q)^2 = \varepsilon \quad (48)$$

Desarrollando esta ecuación se obtendrá:

$$\begin{aligned} & k_{31}Q_{31}^2 + 2 k_{31}Q_{31}\Delta Q + k_{31}\Delta Q^2 \\ & + k_{12}Q_{12}^2 + 2 k_{12}Q_{12}\Delta Q + k_{12}\Delta Q^2 \\ & - k_{34}Q_{34}^2 + 2 k_{34}Q_{34}\Delta Q + k_{34}\Delta Q^2 \\ & - k_{42}Q_{42}^2 + 2 k_{42}Q_{42}\Delta Q + k_{42}\Delta Q^2 = \varepsilon \end{aligned} \quad (49)$$

De esta última ecuación se puede obtener

$$\Delta q = - \frac{\sum k_{ij} Q_{ij}^2}{2 \sum k_{ij} Q_{ij}} + \frac{\varepsilon - \Delta Q^2 \sum k_{ij}}{2 \sum k_{ij} Q_{ij}} \quad (50)$$

Por tanto, para valores pequeños de ΔQ , el segundo término del segundo miembro resulta despreciable respecto al primero, de modo que finalmente se obtiene.

$$\Delta q = \frac{\sum k_{ij} q_{ij}^2}{2 \sum k_{ij} q_{ij}} \quad (51)$$

La ecuación 51 constituye la base de un criterio de convergencia hacia la solución, ya que el numerador del segundo miembro se acercara a cero cuando los gastos calculados como

$$q_{ij}^n = q_{ij}^{n-1} + \Delta q^{n-1} \quad (52)$$

se acerquen al valor "real" q_{ij} con el que se satisfaga la ecuación 51. Concretamente, este criterio consistirá en:

1. Definir la geometría de la red, fijando L_{ij} y D_{ij}

Definir las demandas en los nudos q_i (+)

Definir los ingresos en los nudos q_i (-)

Constatar que unas y otros satisfacen la condición de continuidad.

2. Calcular los valores de k_{ij} según la ecuación 10 ($C_{ij} = k_{ij}$)

Dividir la red en "circuitos" y fijar en sentido "positivo".

Suponer un sentido de escurrimiento a una primera serie de valores $q_{ij}(0)$ y seleccionar sus valores, teniendo cuidado de que se cumpla el principio de continuidad en cada nudo.

3. En cada circuito calcular Δq con la ecuación 51.

4. Comprobar que el menor valor absoluto de Δq en todos los circuitos es menor o igual que cierta tolerancia. Si esto se ha cumplido, pasar al inciso 7; si no es así, calcular nuevos valores para q_{ij} .

$$q_{ij}^{(1)} = q_{ij}^{(0)} + \Delta q^{(0)}$$

Esta operación, hecha en cada circuito, implica la necesidad de corregir dos veces en los tubos que sean comunes, respetando las convenciones de signo en cada circuito.

5. Revisar que los signos de $q_{ij}^{(1)}$ sean los de $q_{ij}^{(0)}$, en cuyo caso los signos de k_{ij} serán los mismos que los de la primera iteración; de otra manera habrá que cambiarlos.
6. Regresar al paso 2.
7. Declarar que $q_{ij} \gg q_{ij}^{(n)}$ y calcular los valores de Δh_{ij} con la ecuación 8
8. Formar la piezometría de la red, o sea, atribuir una carga de servicio al medio mas alejado de los de ingresos; avanzar desde esos puntos alejados hacia los de ingreso, sumando las Δh_{ij} correspondientes.

Con esto se llegara a determinar las cargas que deben existir en los nudos de ingreso en este caso para que, con la geometría seleccionada, se puede garantizar que los ingresos q_i (-), se satisfacen las demandas q_i .

Con este procedimiento se ha elaborado el diagrama de bloques que se incluye en seguida; sirvió para preparar el programa que también se adjunta, el cual, como ya se dijo, esta pensado en varias etapas, con el fin de adaptarlo según la capacidad de la calculadora que se desee usar.

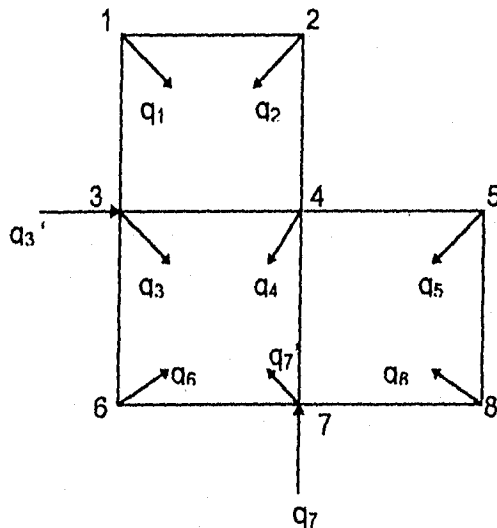


FIGURA 4
(a)

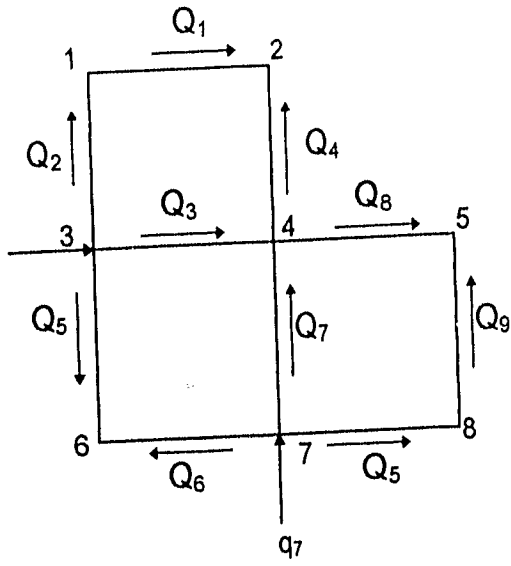


FIGURA 4
(b)

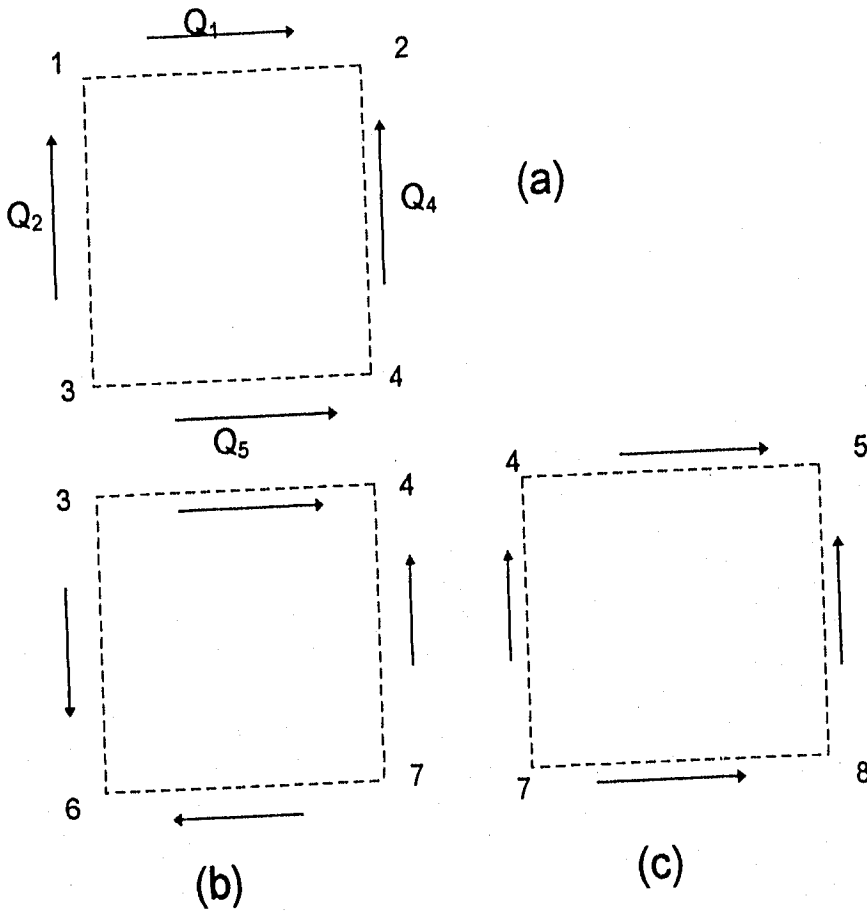


FIGURA 5

MODIFICACION DEL METODO DE HARDY CROSS PARA EL DISEÑO ECONOMICO DE REDES DE DISTRIBUCION DE AGUA POTABLE.¹⁰

Se presenta una simplificación del método de Hardy Cross para que sea empleado como método de diseño y no de revisión. Con ella se logra el diseño económico de una red de abastecimiento de agua conociendo sólo las longitudes de los tramos y los gastos de demanda en los nudos, sin necesidad de proponer los diámetros de las tuberías. Esta simplificación se consigue al suponer que el producto del gasto por un factor que toma en cuenta el diámetro y el coeficiente de rugosidad, es constante en todos los tramos.

Se acepta que el diseño en redes de abastecimiento de agua potable mediante el criterio de conservar constante el producto KQ , en cada tramo de la red, conduce a diseños económicos. De esta manera, es posible simplificar el método de Hardy Cross para transformarlo en uno de diseño económico.⁽¹⁰⁾

En la metodología que aquí se presenta está implícito el criterio de diseño económico.

Si $K|Q|$ es constante en cada tramo, la ecuación (51) se escribe

$$\Delta Q = \frac{-K|Q|\Sigma LQ}{2K|Q|\Sigma L} \quad (53)$$

donde $K = \frac{f}{12.1 D^5}$ Darcy-Weisbach

y al simplificarse, se obtiene

$$\Delta Q = \frac{-\Sigma LQ}{2\Sigma L} \quad (54)$$

Es decir, es posible aplicar el método de Hardy Cross para conocer los gastos en los tramos de la red cerrada, aun antes de conocer los diámetros de las tuberías. Y una vez conocidos dichos gastos, se pueden diseñar las tuberías si se agrega como dato la suma de pérdidas por fricción a favor del circuito (o en contra, los resultados son idénticos), en el circuito exterior, ya que

$$\Sigma h_e = \Sigma K|Q|LQ \quad (55)$$

representa esa suma de pérdidas en el circuito exterior, de donde

$$K = \frac{\Sigma h_e}{\Sigma LQ} = C \quad (56)$$

siendo $K|Q|$ constante en cada tramo, se despeja

$$K = \frac{C}{|Q|} \quad (57)$$

Para hallar los diámetros teóricos en los tramos se tiene la ecuación

$$D = \left(\frac{f}{12.1K} \right)^{1/5} \quad (\text{Darcy-Weisbach}) \quad (58)$$

Finalmente, estos diámetros teóricos se aproximan a los diámetros comerciales.

Se presenta el programa de este método con el nombre de modificación de Hardy Cross.

FIGURA 6
DIAGRAMA DE BLOQUES DEL METODO DE HARDY CROSS

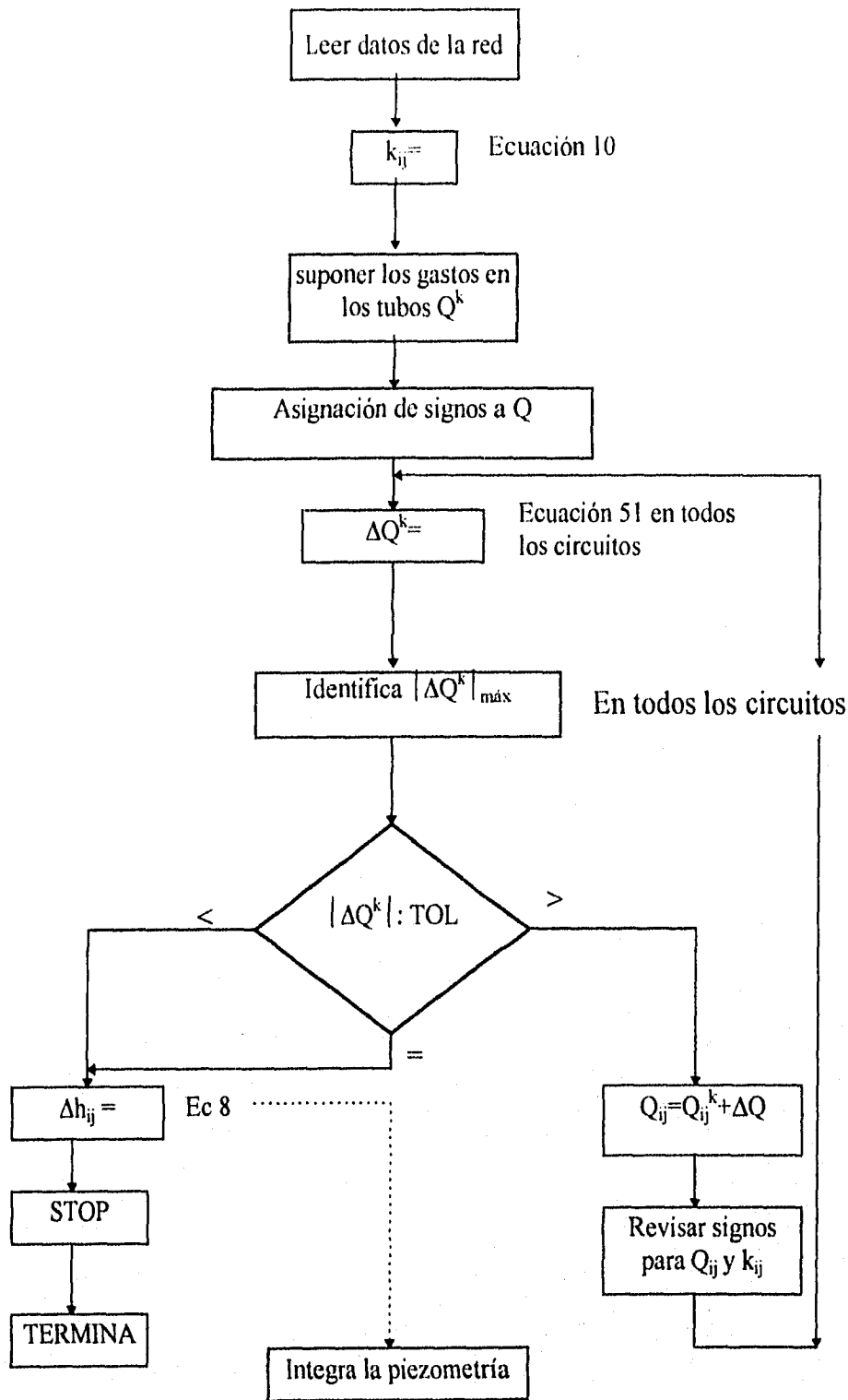
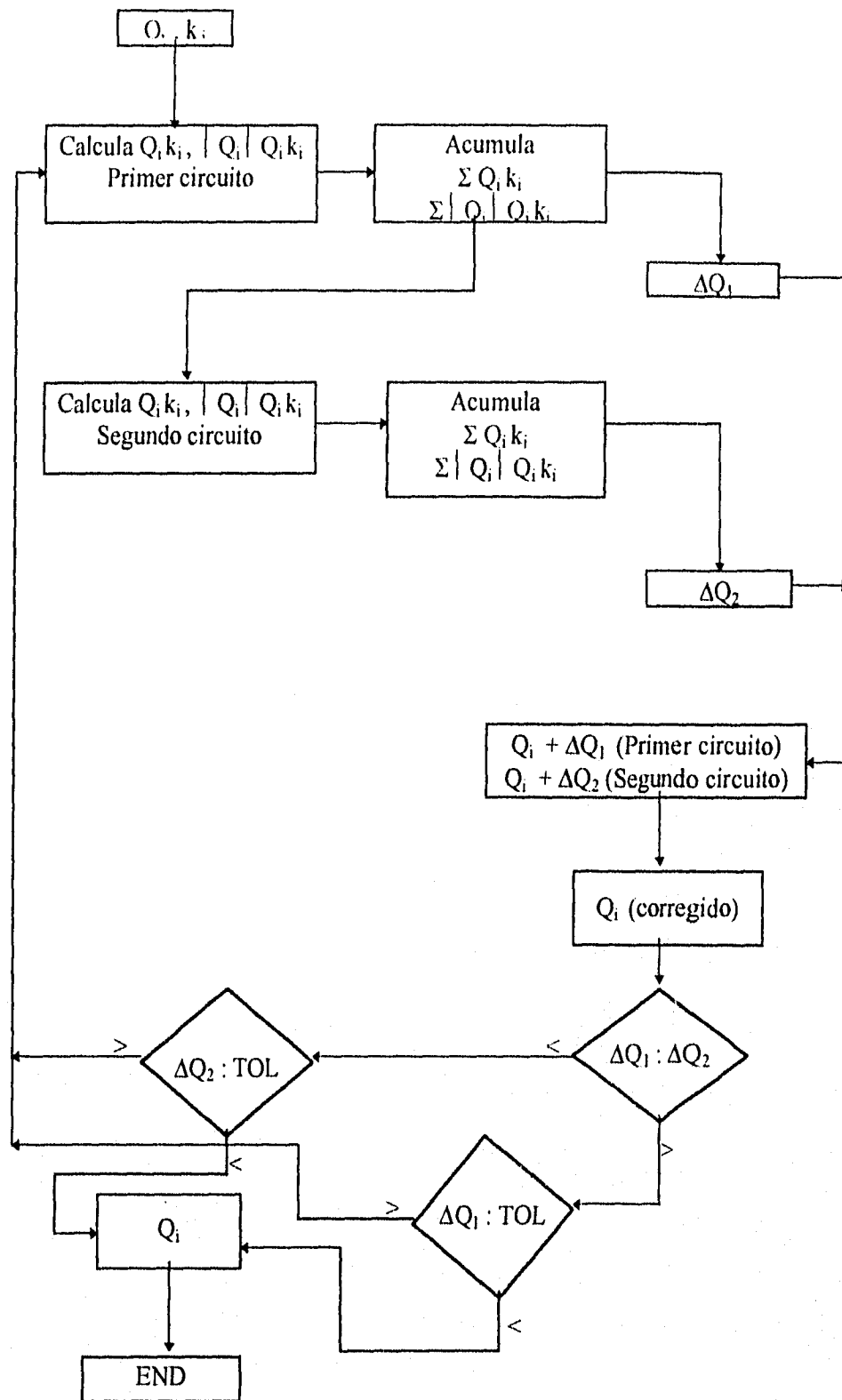


FIGURA 7
 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROGRAMA PRINCIPAL DEL METODO DE
 HARDY CROSS



2.5 METODO POR CORRECCION DE CARGAS

Son conocidas las cargas de presión en los nudos a los cuales llegan gastos $(-Q_{ij})$, o salen gastos $(+Q_{ij})$. Se desean obtener dichos gastos y las pérdidas en los tramos o las cargas piezométricas en los mismos.⁴

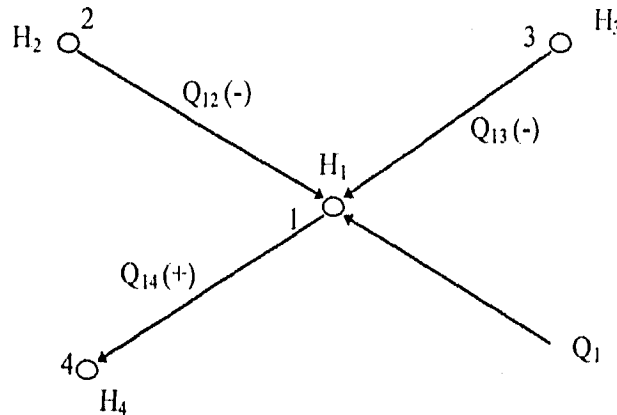


FIGURA 8. Designaciones para las condiciones de nudo

Las pérdidas en los tramos h_{ij} se estiman inicialmente y se corrigen por iteraciones, a partir de los gastos que llegan o salen del nudo.

La condición de nudo implica que se satisfaga la ecuación:

$$\sum Q_{ij} + Q_i = 0 \text{ para } i=1, \dots, n$$

Por otra parte, si h_{ij} representa la pérdida de energía en el tramo del nudo j al i ; y H_i la carga piezométrica en el nudo i , se tiene:

$$Q_{ij} = \left[\frac{h_{ij}}{k_{ij}} \right]^{1/N} = C_{ij} (H_j - H_i)^{1/N} \quad (59)$$

donde

$$C_{ij} = \frac{1}{(k_{ij})^{1/N}} \quad (60)$$

Por lo tanto, el sistema de ecuaciones 61 es el siguiente:

$$\sum_{j \in i} \left[\frac{h_{ij}}{K_{ij}} \right]^{1/N} + Q_i = 0, \text{ para } i=1, \dots, n \quad (61)$$

Si ΔH_i es la corrección de la carga piezométrica en el nudo y, en alguna etapa de la iteración, la ecuación correspondiente a ese nudo sería:

$$\sum \left[\frac{h_{ij} + \Delta H_i}{K_{ij}} \right]^{1/N} + Q_i = 0 \quad (62)$$

$$\sum \left[\frac{h_{ij} + \Delta H_i}{h_{ij} / Q_{ij}^{1/N}} \right]^{1/N} + Q_i = 0$$

$$\sum Q_{ij} \left[\frac{1 + \frac{\Delta H_i}{h_{ij}}}{h_{ij}} \right]^{1/N} + Q_i = 0$$

donde el signo de cada término de la suma se elige de modo que sea, negativo cuando el gasto va hacia el nudo y positivo en caso contrario.

Desarrollando el radical como un binomio, sin considerar términos de orden superior, se obtiene:

$$\sum Q_{ij} \left[1 + \frac{1}{N} \frac{\Delta H_i}{h_{ij}} \right]^{1/N} + Q_i = 0 \quad (63)$$

Por lo tanto, la corrección de la carga de presión en el nudo i es :

$$\Delta H_i = -N \left[\frac{\sum Q_{ij} + Q_i}{\sum (Q_{ij}/h_{ij})} \right] \quad (64)$$

El problema se presenta como sigue:

Los caudales corregidos deben satisfacer el balance de masas. Para el nodo i:

$$\sum_{j \in I_i} (q_{ij}^k + \Delta q_{ij}^k) - Q_i = 0 \quad (65)$$

Donde:

Q_i es el consumo en el nodo i.

I_i es el conjunto de nudos conectados directamente al nodo i

Reordenando términos:

$$\sum q_{ij}^k - Q_i + \sum \Delta q_{ij}^k = 0 \quad (66)$$

Los dos primeros términos de la ecuación representan el balance de masas del nodo i en la iteración k, el cual se satisface si se han utilizado ecuaciones derivadas de la ecuación 66. Sin embargo, es mejor permitir un desbalance para evitar que los errores de redondeo se acumulen y desvíen el balance de masas de su condición inicial. La ecuación 66 se convierte en:

$$\Delta Q_i^k + \sum \Delta q_{ij}^k = 0 \quad (67)$$

Donde:

$$\Delta Q_{ik} + \sum \frac{H_{ik+1} - H_{ik}}{m_{ijk}} - \sum \frac{q_{ijk}}{x} = 0 \quad (68)$$

Reordenando términos para separar las incógnitas (cabezas corregidas) a la izquierda de la igualdad:

$$\sum \frac{H_{ik+1} - H_{ik}}{m_{ijk}} = \sum \frac{q_{ijk}}{x} - \Delta q_{ik} \quad (69)$$

Si todos los elementos de la red fueran todos tuberías, el exponente x sería constante y podría salir de la sumatoria del lado derecho de la igualdad. Otros elementos, como bombas y válvulas, pueden tener exponentes diferentes. La ecuación más general debe incluir el exponente dentro de la sumatoria.

Es un método iterativo para obtener la corrección de cargas en los nudos y los correspondientes flujos en la tuberías, es necesario asumir cargas iniciales para cada nudo. Las cargas de los nudos son corregidas por aproximación sucesiva. Los pasos para el análisis son los siguientes:

- 1) En el dibujo de la red de tubos, indicar efluentes y cargas fijas.
- 2) Asumir cargas arbitrarias pero razonables para cada nudo (excepto para los nudos que tienen cargas fijas).
- 3) Calcular el flujo en cada tubería con nudo de carga variable.
- 4) Calcular los influentes del nudo específico y si este no es cero, corregir la carga por adición de la cantidad

$$\Delta H = \sum Q / \sum (Q/nh) \quad (70)$$

Esta ecuación es derivada como sigue:

Desde

$$Q = (hD^m/kL)^{1/n} \quad (71)$$

$$dQ = Qdh/nh \quad (72)$$

Se requiere

$$\sum (Q + dQ) = 0 \quad (73)$$

Por ejemplo

$$\sum Q + \sum Qdh/nh = 0 \quad (74)$$

Pero $dH = -dh$ donde h es pérdida de carga y H es carga en el nudo. De este modo

$$\Delta H = \sum Q / \sum (Q/nh) \quad (75)$$

El flujo Q y la pérdida de carga son consideradas positivas si van hacia el

nudo. H es la carga en el nudo. Las entradas (positivo) y efluentes (negativo) en el nudo deberán ser incluidos en Q .

- 5) La carga correcta en cada nudo de carga variable en manera similar, ejemplo repetir los pasos 3 y 4 para cada nudo.
- 6) Repetir el procedimiento (pasos 3 al 5) hasta que todos los balances de flujo estén a un suficiente grado de exactitud. Si la diferencias de cargas entre el final de un tubo es cero en cualquier etapa, omitir el tubo de la operación balanceada en particular.

Deberá ser notado que el método de corrección de cargas de nudo en algunos casos converge lentamente o puede ser inestable.

III FUNCIONAMIENTO HIDRAULICO A PRESION EN REGIMEN NO PERMANENTE

En los sistemas de abastecimiento de agua potable el suministro se hace mediante tanques de almacenamiento y sistemas de bombeo; el agua llega primero a los almacenamientos de distribución que regulan los gastos de demanda que varían durante el día.

En las redes de tuberías donde los gastos de entrada y salida son variables en el tiempo, se presentan cambios en los niveles piezométricos y gastos en sus tuberías. Para el estudio de estos cambios se debe tomar en cuenta al tiempo en las ecuaciones que describen el flujo de agua en la red, dando lugar a las llamadas redes dinámicas.

Un aspecto fundamental en el método de la red dinámica es el relativo a la demanda, ya que los gastos proporcionados a los usuarios son aportados desde los tanques de distribución y no directamente de las tuberías que componen a la red. De esta manera, durante los periodos de demanda inferior al gasto medio, se llenan estos tanques, para que, en los lapsos de demanda superior al gasto medio, el gasto requerido se dé con el agua que llega a la red y con la almacenada en estos tanques, con ello se aumenta la posibilidad de cumplir con el servicio y se amortiguan los gastos y cargas de la red.

En el modelo dinámico se toma en cuenta, la forma en que funcionan tanques y bombas entre otros accesorios. Además, se consideran los lapsos en los que están en servicio los tanques de almacenamiento y las bombas, asegurándose que las condiciones hidráulicas de la red permitan su funcionamiento. Esto último, se refiere a que si se desea poner en operación un tanque, este podrá hacerlo si su carga es superior a la carga de la red, o bien en el caso de las bombas, se debe tener en cuenta que aportan agua a la red cuando la carga se encuentra en un cierto intervalo y siempre de acuerdo con su curva característica.

El modelo dinámico empleado se basa en la solución de las ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento de flujo no

permanente funcionando a presión. Para ello se emplea un esquema de diferencias finitas de tipo implícito.

La simulación del funcionamiento de la red comienza con el cálculo de cargas y gastos en toda la red en régimen permanente. Esto es, se parte de resultados como los obtenidos con el método de Cross. Para ello, se debe conocer al menos la carga de un tanque de almacenamiento y los gastos que salen de la red.

También con las ecuaciones del modelo dinámico se pueden obtener las cargas y los gastos de régimen permanente, para lo cual se mantiene sin cambio los niveles de tanques y gastos de demanda. Es importante señalar que esto se lleva a cabo con menos iteraciones que otros métodos para la solución de redes de flujo permanente, por lo que se recomienda su uso para resolver redes estáticas.

ECUACIONES DEL MODELO DINAMICO

Para conocer en el transcurso del tiempo los niveles piezométricos y gastos en la red de tuberías, se plantea la ecuación de continuidad en todas las uniones de ellas y la ecuación de conservación de cantidad de movimiento en cada una de sus tuberías.

Ecuación de conservación de cantidad de movimiento

Para un tubo j cualquiera de la red con extremos s e i (fig. 9) se tiene, de acuerdo con el principio de conservación de cantidad de movimiento, que

$$\Delta P - F = m (dv/dt) = (m/a) (dQ/dt) \quad (76)$$

donde

ΔP diferencia entre las fuerzas debidas a la presión en las secciones transversales de los extremos del tubo j

F fuerza debida a la resistencia del flujo

m masa de agua dentro del tubo

dv/dt derivada de la velocidad v respecto al tiempo

a área de la sección transversal del tubo

dQ/dt derivada del gasto Q respecto al tiempo

Por otra parte, la fuerza debida a la resistencia se puede obtener a partir de la formula de Darcy - Weisbach como

$$F = \gamma a \frac{f L}{2g D} v^2 = \gamma C v^2 \quad (77)$$

siendo:

γ peso especifico del agua

L longitud del tubo,

f coeficiente de rugosidad de la formula de Darcy- Weisbach,

D diámetro de la sección transversal de la tubería .

Para propósitos de integración numérica se propone expresar la ec. 76 en diferencias finitas como

$$\Delta P - F = m \frac{Q^k - Q^{k-1}}{\Delta t} \quad (78)$$

donde

Δt intervalo de tiempo,

k y k-1 superíndices que indican el valor de la variable en el tiempo $t=k\Delta t$.

Los valores medios en un intervalo de tiempo de las fuerzas ΔP y F se expresan como

$$\Delta P = (1-\theta) \gamma (h_s^{k-1} - h_i^{k-1}) + \theta \gamma a (h_s^k - h_i^k) \quad (79)$$

$$F = \gamma c (v^{k-1})^2 + \theta 2(v^{k-1}) (v^k - v^{k-1}) \quad (80)$$

donde θ es un factor de peso comprendido entre 0 y 1.

Sustituyendo las ecuaciones 79 y 80 en la 78 y considerando que para un tubo de longitud L, la masa del fluido es $m = \gamma a L$; para el tubo j se obtiene

$$Q^k = \alpha_j^{k-1} (h_s - h_i) + \gamma_j^{k-1} \quad (81)$$

donde

$$\alpha_j^{k-1} = \frac{\theta}{\frac{L_j}{a_j g \Delta t} + \frac{2\theta C_j}{a_j^2} |Q_j|^{k-1}} \quad (82)$$

$$\gamma_j^{k-1} = \frac{(1-\theta)(h_s^{k-1} - h_i^{k-1}) + \frac{2\theta-1}{a_j^2} C_j |Q_j^{k-1}| |Q_j^{k-1}| + \frac{L_j}{a_j g \Delta t} |Q_j^{k-1}|}{L/a_j g \Delta t + (2\theta/a_j) C_j |Q_j^{k-1}|} \quad (83)$$

La ecuación 81 relaciona las cargas piezométricas en los extremos de la tubería con el gasto que circula por ella en el instante k (suponiendo que el flujo es de s a i (fig 9). En estas ecuaciones se acepta que las variables en el instante k-1 son conocidas.

Ecuación de continuidad

En cada nudo i de la red y para el tiempo $t=k\Delta t$, se establece que la suma de los gastos que entran es igual a la de los gastos que salen; así se plantea que

$$\sum Q_j^k = q_{Di}^k \quad (84)$$

Condiciones de frontera

Para los nudos y tubos asociados a tanques, tinacos y válvulas se proponen ecuaciones que tratan de incluir los elementos necesarios para simular su funcionamiento hidráulico. A continuación se describen dichas ecuaciones.

Tanques de almacenamiento.

Las ecuaciones para tubos con uno de sus extremo unido a un tanque, se definen de manera similar a la ecuación 83, solo que en este caso el nudo s corresponde al nivel del tanque que se supone conocido.

Además el tanque solo proporciona agua a la red cuando su carga h_s es mayor que la de los nudos de la red ligados al tanque (fig. 10).

El nivel en el tanque h_s se modifica en cada instante de acuerdo con el ingreso desde el exterior $Q_{m\acute{a}x}$ y el gasto promedio que proporciona el tanque a la red Q_T , por lo cual se considera que el cambio en el tiempo de almacenamiento del tanque está dado por

$$\frac{h_s^k A}{\Delta t} = Q_{m\acute{a}x} - Q_T \quad (85)$$

Bombas.

Supóngase que ahora se conoce la curva de operación de una bomba (figura 9), en este caso la ecuación característica de la máquina se puede ajustar con un polinomio de segundo grado, de esta manera.

$$Q_B = A_0 + A_1 h + A_2 h^2 \quad (86)$$

La expresión anterior se puede aproximar por medio de la serie de Taylor así

$$Q_B^k = Q_B^{k-1} + [A_1 + 2A_2 h^{k-1}] [h^k - h^{k-1}] \quad (87)$$

la cual se puede escribir como

$$Q_B^k = \delta^{k-1} + \beta^{k-1} h^k \quad (88)$$

siendo

$$\delta^{k-1} = Q_B^{k-1} - [A_1 + 2A_2 h^{k-1}] h^{k-1} \quad (89)$$

$$\beta^{k-1} = A_1 + 2A_2 h^{k-1} \quad (90)$$

La ecuación 88 se utiliza cuando h^k está entre 0 y la carga máxima de la bomba; en otro caso, $Q_B^k = 0$

Tanques de distribución

Se considera que el agua es proporcionada a las personas a partir de tanques de distribución. En ellos existe un gasto de entrada desde la red (q_R) y un gasto de salida que corresponde a la demanda de agua (q_D). Como los gastos no son constantes en el tiempo, cuando el gasto aportado por la red q_R sea mayor que el gasto de demanda q_D se almacena agua; la que sale del tanque cuando q_R es menor al gasto q_D . Con estas medidas se amortiguan los gastos solicitados a la red (q_R) y se tienen gastos menores en las tuberías que la componen y por tanto cargas de presión mayores.

Sea q_{TIN} el gasto que en el instante k se podría tomar de la red dado como

$$\begin{aligned} q_{TIN} &= C_{TIN} \sqrt{h^k - h_e} \\ C_{TIN} &= C_o a \sqrt{2g}, \end{aligned} \quad (91)$$

donde

h^k la carga en la red en el instante k ,

h_e la elevación del tanque y

C_o coeficiente de descarga,

a el área por donde circula el agua y

g la aceleración de la gravedad.

Este gasto no es necesariamente el que sale de la red (q_R).

Para definir el gasto q_R se toma en cuenta el gasto q_D^k y al volumen almacenado (V_T^{k-1}) en el tanque en el instante $k-1$. La determinación de q_R es muy importante, ya que de ellos dependen las cargas y gastos en la red.

Cuando en la red de tuberías se tiene cargas grandes, se podría pensar en extraer gastos grandes, mayores a los de demanda, para disponer de un almacenamiento suficiente para cuando la red tenga cargas pequeñas y por ende los gastos que puedan salir de la red sean bajos e inferiores a los gastos de demanda.

Al tomar de la red gasto grandes, de inmediato la carga disminuye, solamente se podrá disponer del agua de la red hasta una

cierta magnitud del gasto a efecto de no bajar demasiado la carga. Esto es tomado en cuenta en el modelo al proponer que los gastos q_R sean plantados en forma implícita, y obtenidos al final de cada intervalo de tiempo.

Para continuar empleando ecuaciones lineales, la ecuación 91 se puede escribir (de acuerdo con la serie de Taylor) en forma aproximada como

$$q_{TIN}^k = \zeta^{k-1} h^k + \gamma^{k-1} \quad (92)$$

siendo

$$\gamma^{k-1} = c_{TIN} \sqrt{h^{k-1} - h_e/2} \quad (93)$$

$$\zeta^{k-1} = \gamma^{k-1} / (h^{k-1} - h_e) \quad (94)$$

En el modelo se plantea el gasto q_R^k en términos de los coeficientes τ y ρ como

$$q_R^k = \tau h^k + \rho \quad (95)$$

Estos coeficientes se determinaran de acuerdo con el diagrama de bloques mostrado en la figura 12.

Ecuaciones por resolver

En la figura 13 se muestra un nudo de la red en el que se conectan las tuberías N1, N2 y N3; además, este nudo recibe suministros de un tanque T y de una bomba B y entrega el agua a un tanque de distribución TD. La ecuación de continuidad en el nudo para el instante k es

$$q_T^k + q_B^k + q_{N1}^k = q_{N3}^k + q_{N2}^k + q_R^k \quad (96)$$

el expresar los gastos q_T^k , q_{N1}^k , q_{N2}^k y q_{N3}^k de acuerdo con la ecuación 87 el gasto q_B^k según la ecuación 87 y q_R^k con la ecuación 95, se tiene

$$(-\alpha_{N1}^{k-1} - \alpha_{N2}^{k-1} - \alpha_{N3}^{k-1} - \alpha_T^{k-1} + \beta^{k-1} - \tau) h_N^k + -\alpha_{N1}^{k-1} h_M^k - \alpha_{N2}^{k-1} h_k^k - \alpha_{N3}^{k-1} h_L^k = \gamma_{N1}^{k-1} - \gamma_{N2}^{k-1} - \gamma_{N3}^{k-1} - \gamma_T^{k-1} + \delta^{k-1} \rho \quad (97)$$

En los otros nudos de la red se plantean ecuaciones similares, con lo que se establece un sistema de ecuaciones lineales. Este sistema tiene tantas ecuaciones como nudos (excepto los de tanques) tenga la red.

La solución del sistema corresponde a los niveles piezométricos h^k con los cuales por medio de la ecuación 81 se obtienen los gastos en las tuberías. De esta manera al plantear y resolver el sistema de ecuaciones lineales para todos los intervalos de tiempo de interés, se conocen los niveles piezométricos y los gastos. Con ello se simulará el funcionamiento hidráulico de la red y se determinan las posibilidades de satisfacer la demanda en cada instante.

Como en el modelo se requiere resolver un sistema de ecuaciones lineales que tiene una matriz de coeficientes con gran parte de elementos nulos por lo que es conveniente emplear un método de solución de estos sistemas que aprovecha esta circunstancia y, que por tanto, dará la solución con pocos cálculos y necesitara para su caso poca memoria de computadora. Esto es mucho mas importante para este modelo, ya que tal sistema se resuelve varias veces, cada una de ellas para encontrar en los distintos tiempos de interés las cargas y gastos en la red de tuberías.

Se presenta un programa para resolver redes dinámicas de tuberías²³ (ver apéndice).

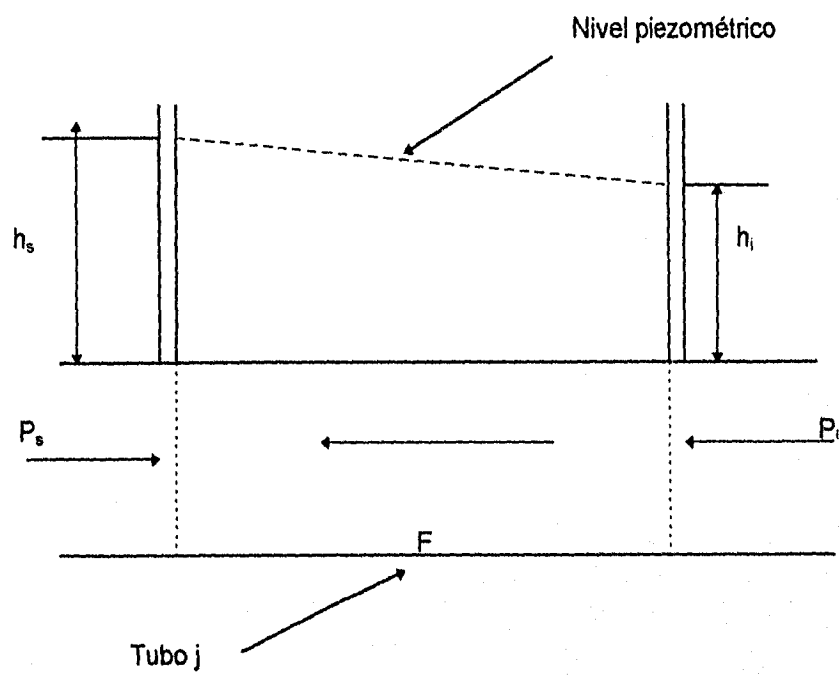


FIGURA 9
FUERZAS QUE ACTUAN EN EL TIEMPO t

FIGURA 10
CONSIDERACIONES PARA LAS ECUACIONES DEL TANQUE

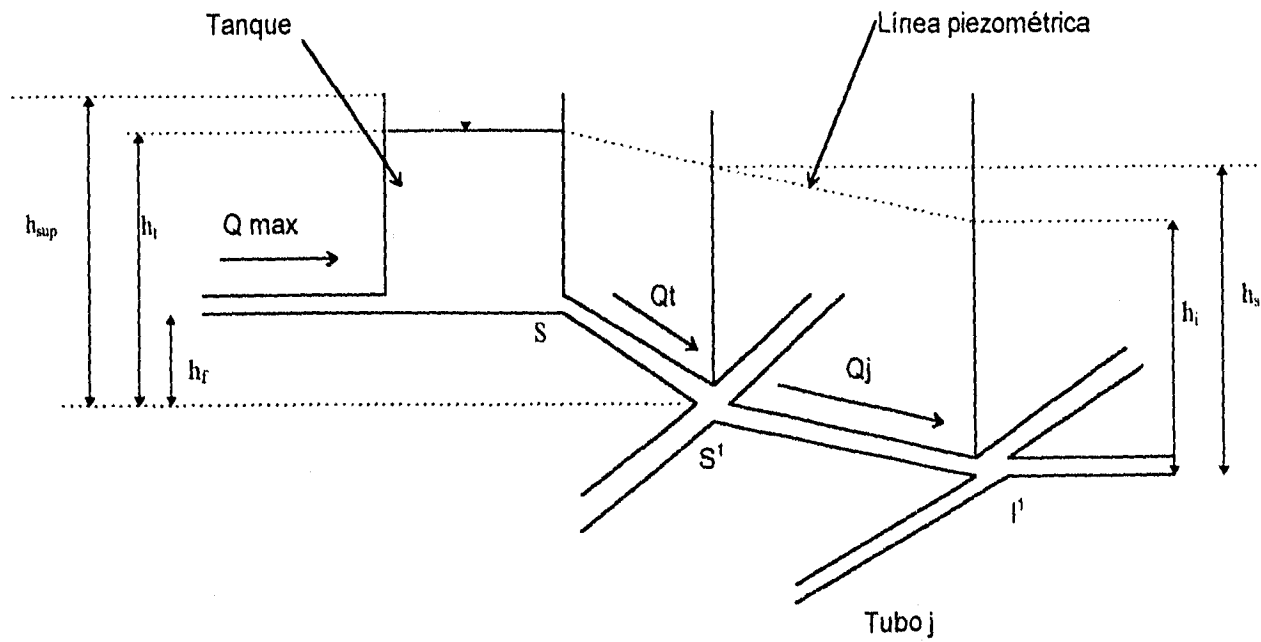


FIGURA 11
CURVA DE OPERACION DE UNA BOMBA

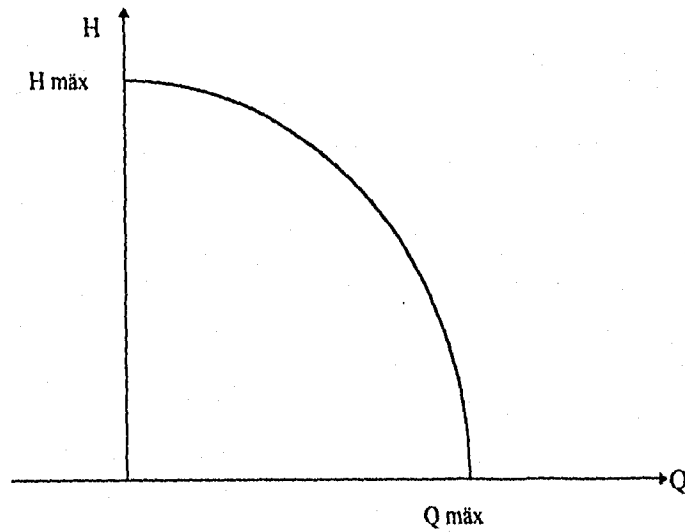


FIGURA 12

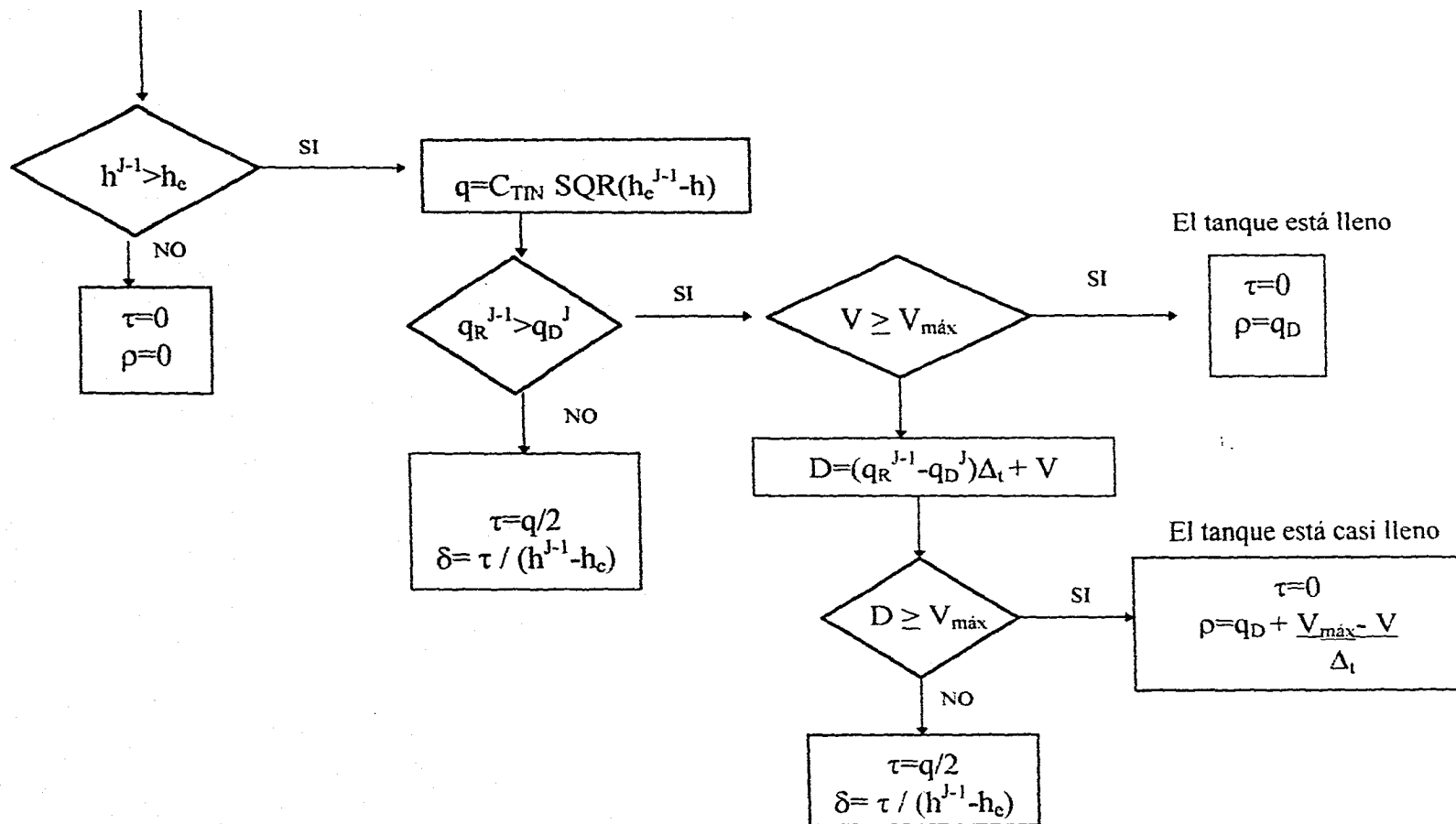


FIGURA 13
NUDO N DE LA RED

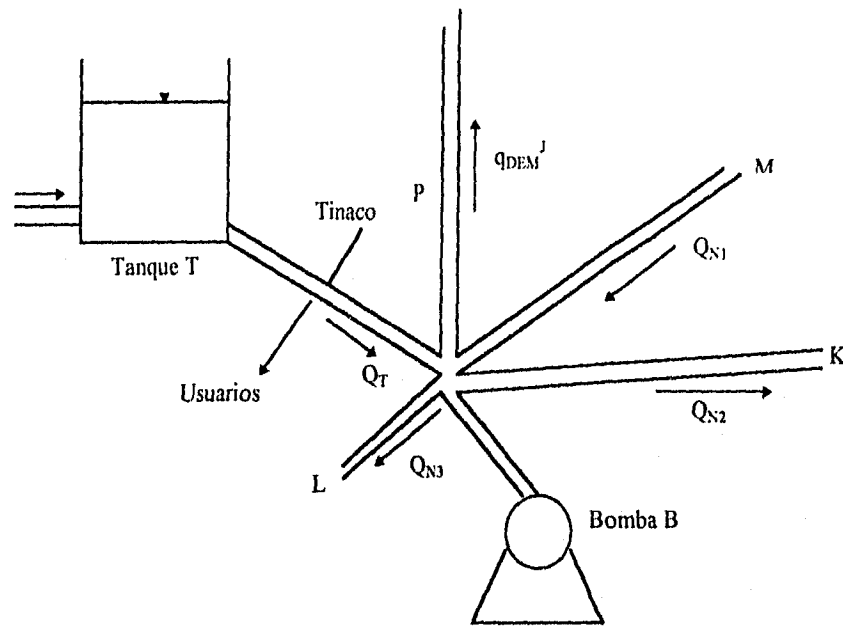


FIGURA 14
DIAGRAMA DE BLOQUES

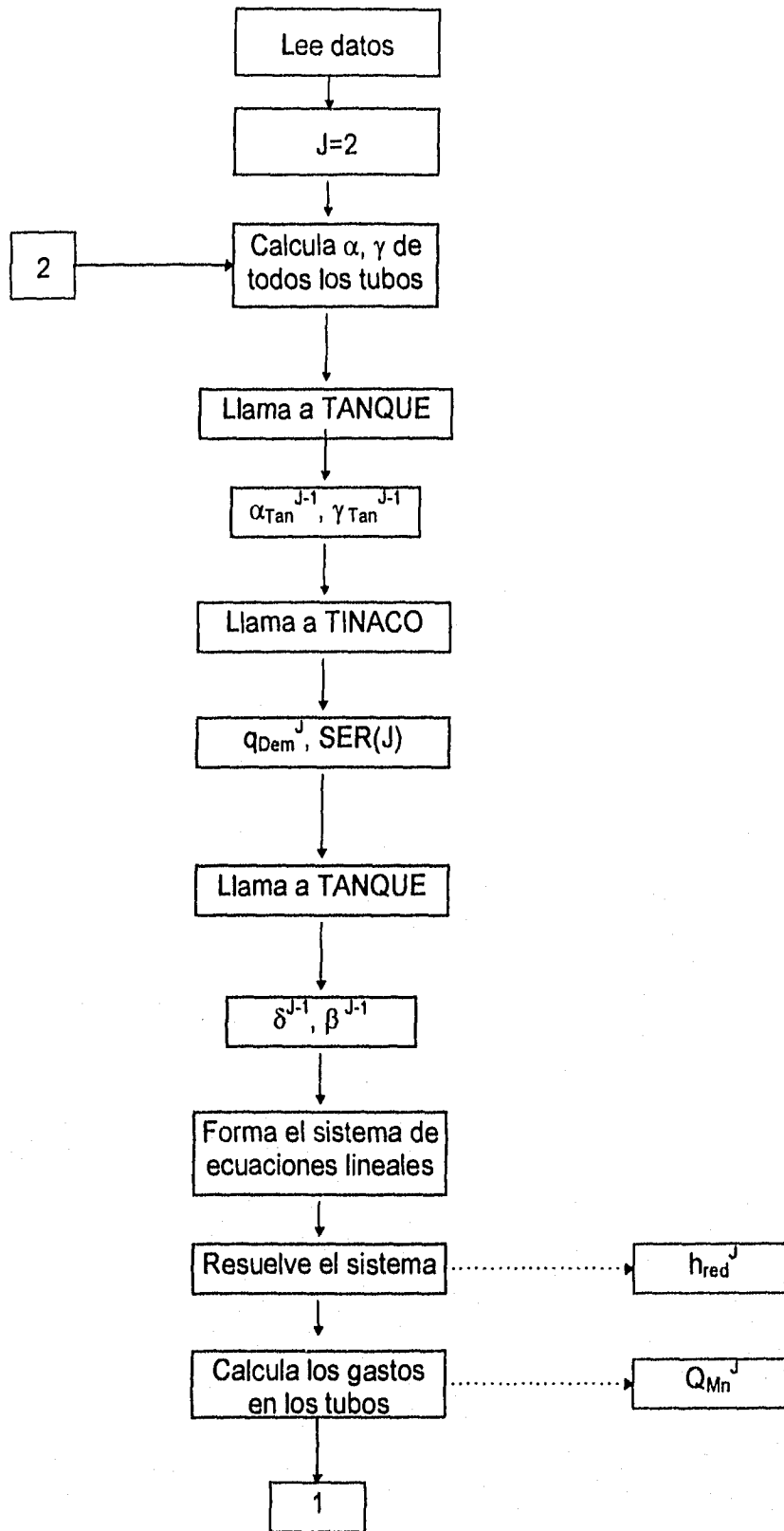


FIGURA 15

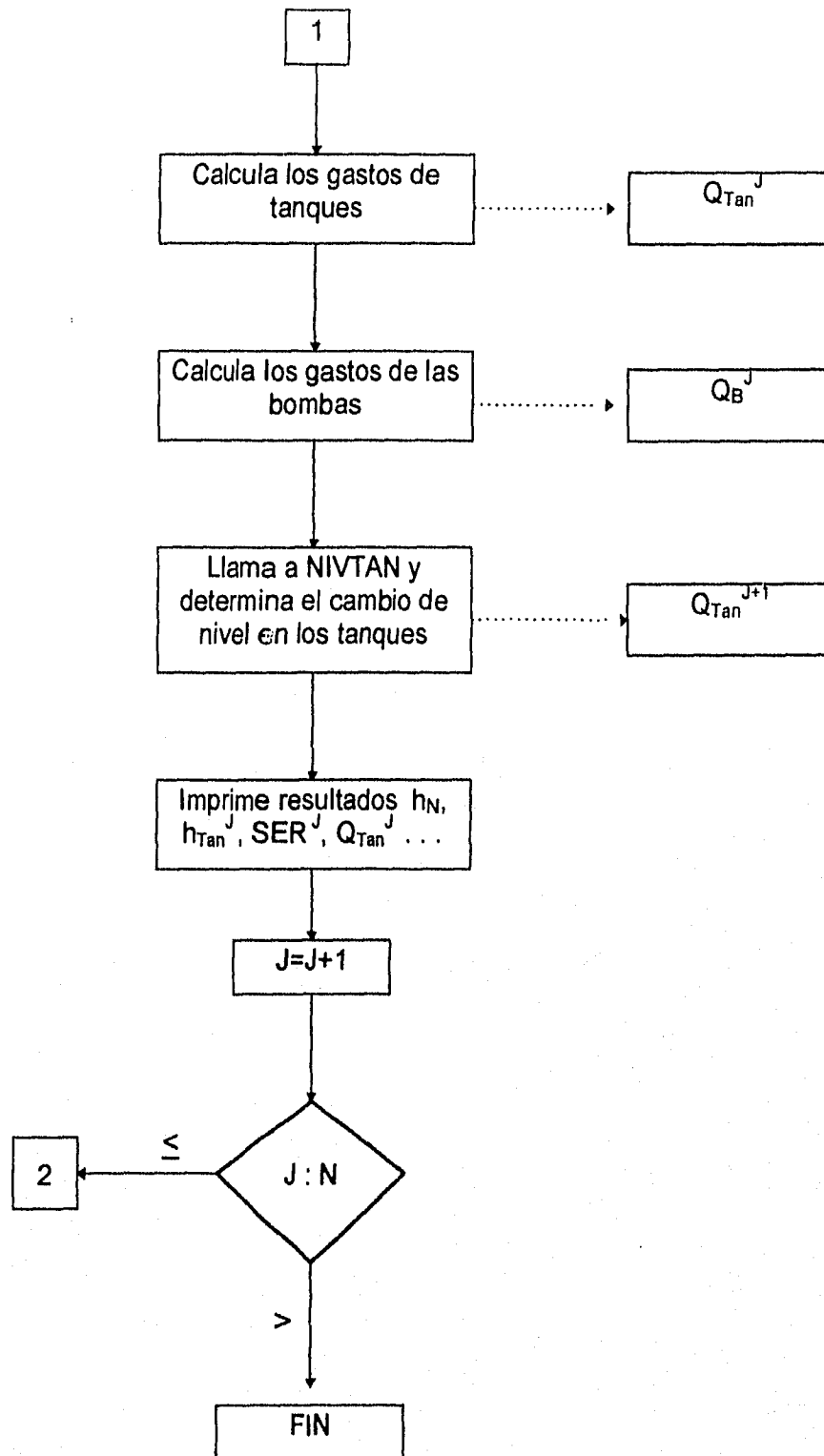
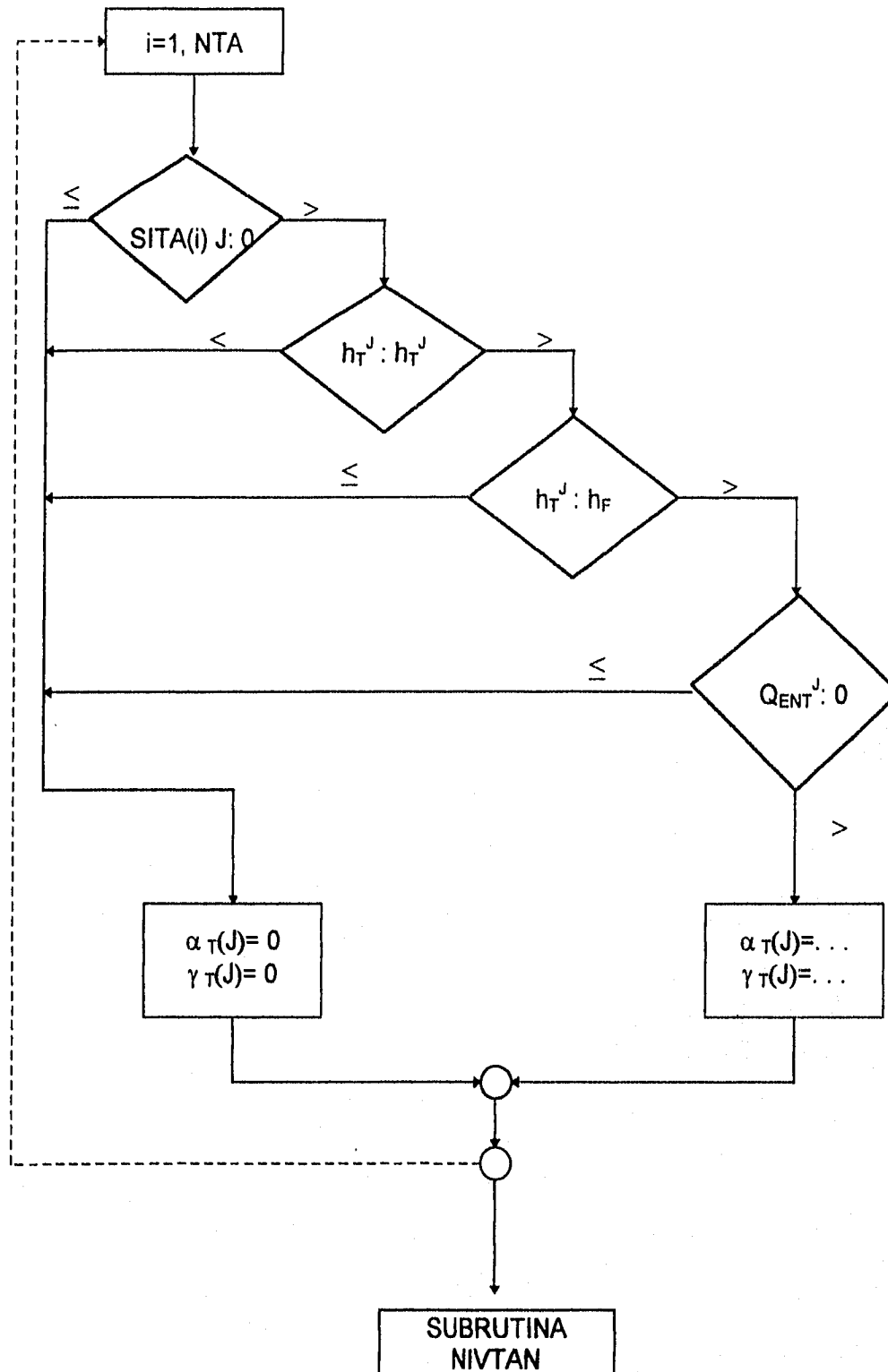


FIGURA 16
SUBROUTINA TANQUE



SUBROUTINA NIVTAN

FIGURA 17

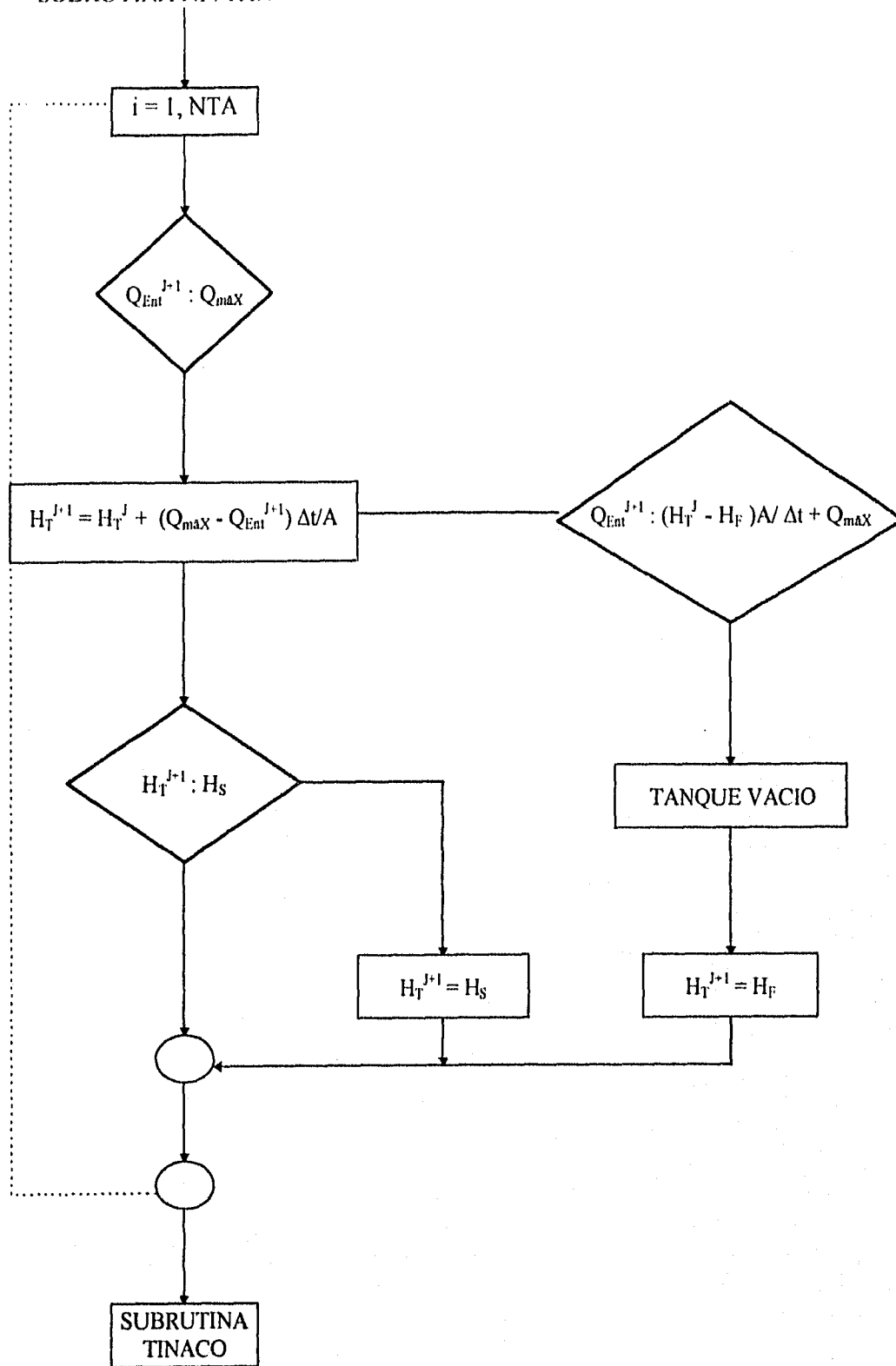
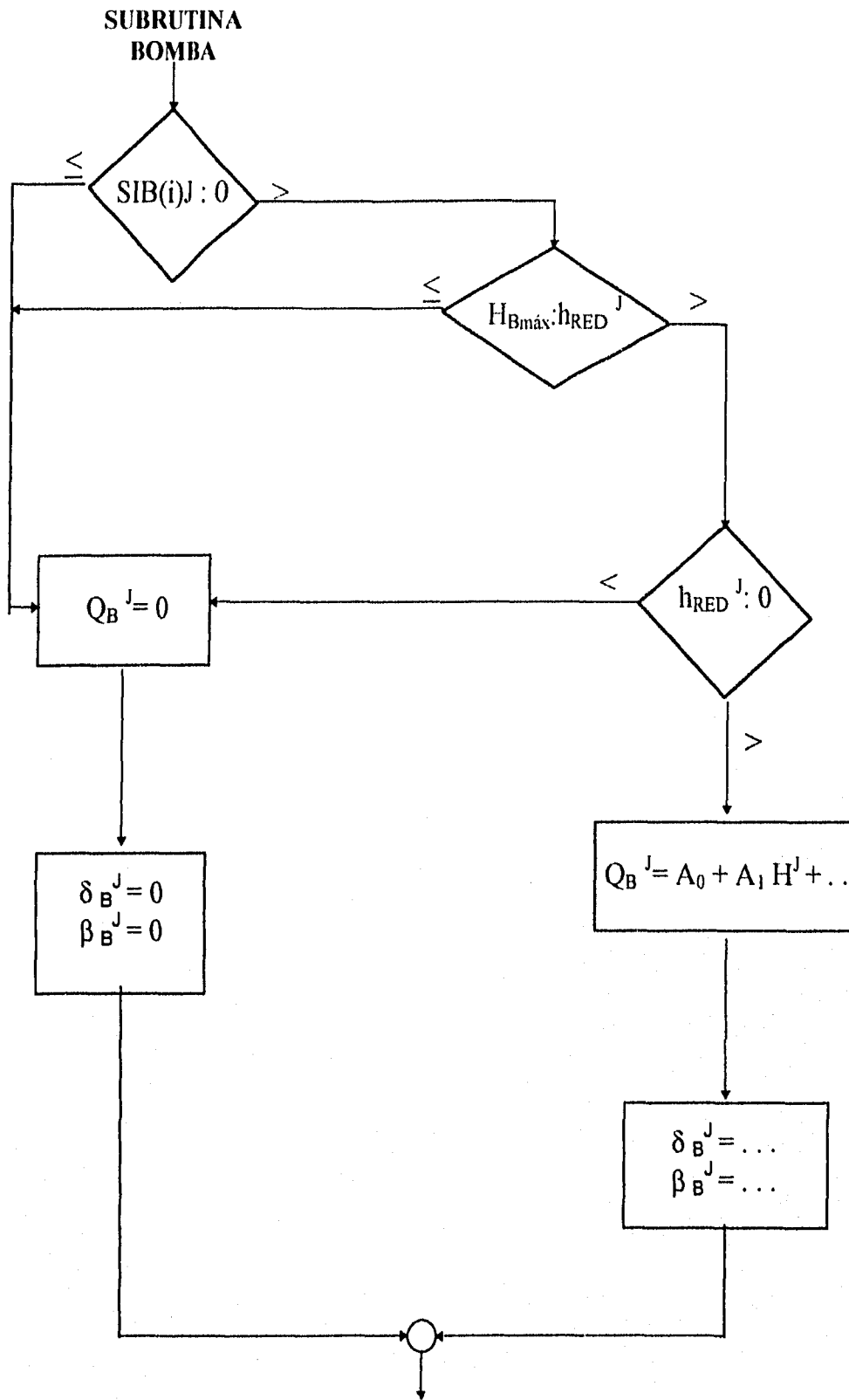


FIGURA 18



BREVE RESUMEN DE LOS METODOS NUMERICOS EXISTENTES PARA EL ANALISIS DEL ESCURRIMIENTO NO PERMANENTE

Los principios físicos que describen el flujo no permanente en tuberías son fundamentalmente dos, y están representados por las ecuaciones dinámica (o del momentum) y de conservación de la materia (o de continuidad), las que en conjunto forman el sistema (98) de ecuaciones diferenciales hiperbólicas cuasi-lineales.

$$\begin{bmatrix} Q \\ \dots \\ H \end{bmatrix}_t + \begin{bmatrix} V : gA \\ \dots \\ \frac{a}{gA} : V \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Q \\ \dots \\ H \end{bmatrix}_s + \begin{bmatrix} \frac{f}{2DA} |Q|Q \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (98)$$

donde

a velocidad de traslación de la onda de presión

t y s indican derivada parcial con respecto al tiempo y posición, respectivamente.

La parte superior de la ecuación 98 representa a la ecuación dinámica y la inferior a la de continuidad. La ecuación es general y se puede reducir al transitorio lento y al flujo permanente, planteando el problema de escurrimiento en redes en función de las variables de estado Q y H.

Además, se debe considerar algunas relaciones de tipo constitutivo, como la expresión que relaciona las pérdidas de cargas con el caudal o la expresión que describe el comportamiento de un gas a presión en una cámara hidroneumática:

$$\text{Ecuación politrópica: } H V^n = \text{constante} \quad (99)$$

donde V volumen de aire

n exponente politrópico, normalmente entre 1 y 2

Nótese que la fórmula de Darcy-Weisbach ya está contenida en (98), aunque también puede usarse otra, como la de Hazen Williams. Si se desprecian los términos advectivos de (98), lo que es especialmente válido en el caso del escurrimiento no permanente rápido (o sea donde $a \gg V$), el sistema (98) se reduce a

$$\begin{bmatrix} Q \\ \dots \\ H \end{bmatrix}_t + \begin{bmatrix} 0 : gA \\ \dots \\ \frac{a}{gA} : 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Q \\ \dots \\ H \end{bmatrix}_s + \begin{bmatrix} \frac{f}{2DA} |Q| Q \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (100)$$

En general, salvo casos particulares sencillos, el problema matemático representado por el sistema de ecuaciones (98) o (100) no tiene solución analítica y sólo es posible resolverlo numéricamente. Estos últimos se remontan a la década de los sesenta, con el advenimiento del computador digital.

MÉTODOS NUMERICOS DE SOLUCION EXISTENTES.

En general, todos los métodos numéricos discretizan cada tramo de la red en una cantidad de subtramos, de manera que en cada uno de ellos se pueda reemplazar los diferenciales (infinitesimales) por diferencias (finitas).

3.1 METODO DE LAS CARACTERISTICAS.

El método de las características ha sido el método explícito más usado en el flujo no permanente en tuberías, así como en canales, por la facilidad para introducir diferentes dispositivos y condiciones de frontera (bombas, válvulas, cámaras neumáticas, etc). Sin embargo, como todo método explícito, adolece de restricciones desde el punto de vista de su estabilidad numérica.

El método de las características proyecta los sistemas (98) o (100) sobre planos característicos cuyas trazas en el plano posición/tiempo son las denominadas líneas características, transformándolos en sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias, por ejemplo, en el caso del sistema (100) o de "solución aproximada", se tiene

$$\frac{dQ}{dt} \pm \frac{gA}{a} \frac{dH}{t} + \frac{fQ}{2DA} \quad (101)$$

válidas respectivamente, sobre las líneas características :

$$\frac{ds}{dt} = \pm a \quad (102)$$

Existen dos modalidades para aplicar el método de las características, el método de los "intervalos de tiempo pre - especificados" y el "método de la malla de características", predominando el primero, por ello se hará referencia sólo a él.

El paso de tiempo queda determinado por el tubo mas corto, por lo que los intervalos de posición en los tubos mas largos deben ser determinados a posteriori; aun así, los intervalos de tiempo de cada tubo no coincidirán, lo que finalmente se logra modificando levemente la velocidad de la onda o utilizando interpolaciones. Las interpolaciones se realizan comúnmente en el eje de la posición, aunque estas interpolaciones causan dispersión y atenuación numérica.

Las ecuaciones (101) pueden ser integradas explícitamente, por diferencias finitas. Considerando los signos positivos y negativos de (101) y (102), se obtienen las ecuaciones características positiva (C^+) y negativa (C^-), respectivamente:

$$C^+ : H_P = C_P - B Q_P \quad (103)$$

y

$$C^- : H_P = C_M + B Q_P \quad (104)$$

donde las constantes B , C_P y C_M dependen de las características físicas del problema y del valor de las variables de estado en el tiempo previo (conocido).

Se tiene por tanto, un sistema de dos ecuaciones lineales en las incógnitas, H_P y Q_P , los valores de las variables de estado al final del intervalo de tiempo. Sumando (103) y (104) se puede obtener H_P y restándolo se obtiene Q_P .

$$\begin{array}{ll} H_P = H_P & Q_P = Q_P \\ C_P - BQ_P = C_M + BQ_P & (H_P - C_P) - B = (H_P - C_M)/B \\ C_P - C_M = 2BQ_P & H_P - C_P = -H_P + C_M \\ (C_P - C_M)/2B = Q_P & 2H_P = C_P + C_M \\ & H_P = (C_P + C_M)/2 \end{array}$$

por lo tanto

$$H_P = (C_P + C_M)/2 \quad (105)$$

$$Q_P = (C_P - C_M)/2B \quad (106)$$

Las ecuaciones (105) y (106) permiten calcular H_P y Q_P para todo punto de una sección interior de la malla de características, excepto en los puntos extremos, para los cuales se requiere de una ecuación de frontera adicional, que relacione H con Q en tales puntos. Esta última ecuación debe resolverse conjuntamente con la ecuación característica negativa o positiva, según se trate de la primera o última sección de la subdivisión, respectivamente. La situación inicial es conocida, generalmente flujo permanente.

Suponiendo que no hay pérdida de carga ni almacenamiento en el nudo, la ecuación de compatibilidad propuesta por Karney (1984) y que liga a todos los tramos, consumos o estanques que se conectan al tubo es

$$H_P = C_C - B_C Q_{ext} \quad (107)$$

donde C_C , B_C son constantes conocidas y el caudal Q_{ext} puede ser constante, función del tiempo o de alguna relación constitutiva (por ejemplo, ecuación politrópica)

La ecuación (107) representa una propiedad muy importante del método de las características, que no ha sido totalmente explotada en muchos algoritmos numéricos existentes, e implica que una red muy compleja puede ser desacoplada en cada nudo, siempre y cuando se agregue como condición de frontera una ecuación de compatibilidad (ecuación 107) que mantenga la continuidad de caudales a nivel nodal (como en el caso permanente, suponiendo que no hay almacenamiento en el nudo) y que establezca la unicidad de la cota piezométrica en cada nudo. El método, plantea algunas restricciones adicionales, tal como la necesidad de subdivisiones del tubo en una cantidad par de subtramos y complica la inicialización del algoritmo.

Todas las alternativas para el método de las características son explícitas y, por ende, deben satisfacer las condiciones de Courant-Friedrich-Lewy para garantizar su estabilidad numérica.

3.2 METODO DE DIFERENCIAS FINITAS.

Los diferenciales (infinitesimales) de las ecuaciones básicas se aproximan por diferencias finitas, transformando el problema en la solución de ecuaciones algebraicas desacopladas o en la solución de un sistema de ecuaciones no-lineales simultáneas. La no linealidad proviene del término friccional en la ecuación de la dinámica, pero normalmente se le linealiza con el caudal de la iteración anterior.

Por su simplicidad y facilidad de aplicación, los métodos de diferencias finitas gozan de amplia aceptación en la modelación de otros sistemas físicos, otros fenómenos transitorios, dispersión de contaminantes, etc.

A diferencia del método de las características, los métodos de diferencias finitas involucran una aproximación de las ecuaciones diferenciales parciales y, por lo tanto, implican la aparición de errores de discretización y problemas de estabilización numérica.

Los esquemas más simples de diferencias finitas son del tipo explícito, como los de diferencias hacia adelante, el esquema difusivo y otros. La aplicación de este tipo de esquemas está ampliamente documentada (Chaudhry, 1982 y 1987). Su principal limitación está en

las restricciones a la magnitud del incremento temporal, para satisfacer la condición de estabilidad de Courant-Friedrich-Lewy. Aun cumpliendo con la condición de estabilidad, el método no es satisfactorio, especialmente en la modelación de transitorios muy rápidos (Chaudhry, 1987).

Por ejemplo, si se utiliza el esquema difusivo, las ecuaciones que permiten calcular explícitamente las variables de estado son:

$$Q_i^{j+1} = 0.5 (Q_{i-1}^j + Q_{i+1}^j) + A1 (H_{i+1}^j + H_{i-1}^j) - A2 (Q_{i-1}^j + Q_{i+1}^j) | Q_{i-1}^j + Q_{i+1}^j | \quad (108)$$

$$H_i^{j+1} = 0.5 (H_{i-1}^j + H_{i+1}^j) + A3 (Q_{i+1}^j + Q_{i-1}^j) \quad (109)$$

donde el subíndice (i) se refiere a la posición en la discretización del tramo y el superíndice (j) al tiempo. A1, A2 y A3 son constantes que dependen de características físicas del problema y de los incrementos de tiempo y posición adoptados.

Como puede verse de (108) y (109), no se generan sistemas de ecuaciones simultáneas, siendo esta una principal ventaja.

A diferencias de los métodos de diferencias finitas explícitos, los implícitos son incondicionalmente estables, permitiendo, al menos en teoría, el uso de incrementos temporales mayores que los exigidos en los métodos explícitos. Sin embargo, la necesidad de aproximar los diferenciales del sistema 100 por diferencias finitas, limita el tamaño de los incrementos de tiempo a valores comparables con los requeridos en los métodos explícitos.

Entre los métodos implícitos más conocidos están: Cranck-Nicolson, cuatro puntos (centrados o ponderados), seis puntos, etc. El uso de este tipo de métodos en flujo no permanente en tuberías está ampliamente documentado (Chaudhry, 1981), siendo el método de los cuatro puntos centrados el más utilizado.

A pesar de sus características intrínsecas de estabilidad, los métodos implícitos no están exentos de dispersión y atenuación numérica.

Utilizando el esquema implícito de los cuatro puntos centrados, el sistema de ecuaciones 100 se discretiza como

$$Q_i^{j+1} + Q_{i+1}^{j+1} - C1 H_i^{j+1} + C1 H_{i+1}^{j+1} + C2 = 0 \quad (110)$$

$$Q_i^{j+1} + Q_{i+1}^{j+1} - C3 H_i^{j+1} - C3 H_{i+1}^{j+1} + C4 = 0 \quad (111)$$

C1, C2, C3 y C4 son constantes que dependen de características físicas, de los valores previos de las variables de estado y de los incrementos temporales y espaciales de discretización.

El sistema de ecuaciones (110) y (111) tiene cuatro incógnitas Q_i^{j+1} , Q_{i+1}^{j+1} , H_i^{j+1} , H_{i+1}^{j+1} , las que deben ser resueltas simultáneamente con las ecuaciones de los restantes subtramos de la discretización, con dos ecuaciones adicionales que representen las ecuaciones de frontera del problema y otras que impongan la continuidad de caudales a nivel nodal (no existe acumulación en los nudos). La situación inicial es conocida, generalmente una condición de flujo permanente.

En la ecuación dinámica (110) el término friccional no aparece explícitamente, ya que se ha linealizado con el valor del caudal en el instante conocido, sin embargo, esta es una simplificación satisfactoria solo cuando la magnitud del caudal es pequeña o cuando su incremento en el espacio es pequeño.

Método de Elementos Finitos

El espacio continuo es discretizado y estudiado solo en algunos puntos. Las funciones a integrar son aproximadas por funciones mas simples (lineales).

La aplicación del método de elementos finitos en problemas de estructuras, mecánica de sólidos, suelos y fluidos es ampliamente conocida. Básicamente se trata de un método de integración de ecuaciones diferenciales parciales y, como tal, es factible de ser utilizado en el estudio del flujo no permanente. La aplicación del método de elementos finitos al flujo no permanente en tuberías y canales ha sido conocida desde hace tiempo.

Utilizando el esquema implícito de los cuatro puntos centrados, el sistema de ecuaciones 100 se discretiza como

$$Q_i^{j+1} + Q_{i+1}^{j+1} - C1 H_i^{j+1} + C1 H_{i+1}^{j+1} + C2 = 0 \quad (110)$$

$$Q_i^{j+1} + Q_{i+1}^{j+1} - C3 H_i^{j+1} - C3 H_{i+1}^{j+1} + C4 = 0 \quad (111)$$

C1, C2, C3 y C4 son constantes que dependen de características físicas, de los valores previos de las variables de estado y de los incrementos temporales y espaciales de discretización.

El sistema de ecuaciones (110) y (111) tiene cuatro incógnitas Q_i^{j+1} , Q_{i+1}^{j+1} , H_i^{j+1} , H_{i+1}^{j+1} , las que deben ser resueltas simultáneamente con las ecuaciones de los restantes subtramos de la discretización, con dos ecuaciones adicionales que representen las ecuaciones de frontera del problema y otras que impongan la continuidad de caudales a nivel nodal (no existe acumulación en los nudos). La situación inicial es conocida, generalmente una condición de flujo permanente.

En la ecuación dinámica (110) el término friccional no aparece explícitamente, ya que se ha linealizado con el valor del caudal en el instante conocido, sin embargo, esta es una simplificación satisfactoria solo cuando la magnitud del caudal es pequeña o cuando su incremento en el espacio es pequeño.

Método de Elementos Finitos

El espacio continuo es discretizado y estudiado solo en algunos puntos. Las funciones a integrar son aproximadas por funciones más simples (lineales).

La aplicación del método de elementos finitos en problemas de estructuras, mecánica de sólidos, suelos y fluidos es ampliamente conocida. Básicamente se trata de un método de integración de ecuaciones diferenciales parciales y, como tal, es factible de ser utilizado en el estudio del flujo no permanente. La aplicación del método de elementos finitos al flujo no permanente en tuberías y canales ha sido conocida desde hace tiempo.

En este estudio se presenta un programa utilizando este método.

3.3 METODOS HIBRIDOS

Se combinan dos de algunos de los métodos anteriores, para producir algoritmos que, en lo posible, conserven las ventajas y reduzcan las desventajas que pueda tener cada uno de ellos utilizados por separado.

Por ejemplo, en el contexto del método de diferencias finitas explícito basado en el esquema difusivo, para suplir la carencia de una ecuación en las secciones de frontera, se recurre al método de las características para proveer la ecuación faltante.

Karney (1984), en el contexto del método de las características con intervalos pre-fijados, utiliza el método de diferencias finitas para eliminar los tubos cortos de una red compleja, incrementando así los intervalos de tiempo y reduciendo la carga computacional.

Watt et al. (1980) comparan algoritmos híbridos del método de las características con los métodos de diferencias finitas implícitos y el método de elementos finitos, buscando flexibilizar los incrementos temporales y espaciales exigidos por el método de las características. El problema matemático representado por el sistema de ecuaciones (98) no tiene solución analítica directa, debiendo resolverse numéricamente. El algoritmo híbrido que se presenta trata de utilizar el método de las características como colaborador del método de diferencias finitas implícitas, para aprovechar los mayores incrementos de tiempo permitidos por este último. Para linealizar los sistemas de ecuaciones no lineales resultantes se usará el caudal de la iteración anterior.

El objetivo es reducir la dispersión y atenuación numérica inherente al método de las características cuando es aplicado como algoritmo único

Con la utilización del método de las características, se desacoplará la red en los nudos, a costa de imponer una ecuación de compatibilidad (ecuación 107). Esto permitirá aplicar el método de diferencias finitas implícitas a cada tubo en forma independiente de los demás,

reduciendo el tamaño del sistema de ecuaciones simultáneas no-lineales a cada tubo, en lugar de la red completa.

Las ecuaciones (107), (110) y (111) se ensamblan y se resuelven para cada tramo; omitiendo el superíndice "j+1", por simplicidad, dan lugar al sistema lineal de ecuaciones (112)

$$\begin{array}{cccccccccccc|c|c|c}
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q1 & b1 \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & H1 & b2 \\
 1 & -C1 & 1 & C1 & & & & & & & & & Q2 & -C2 \\
 1 & -C3 & -1 & -C3 & & & & & & & & & H2 & -C4 \\
 & & 1 & -C1 & 1 & C1 & & & & & & & Q3 & -C2 \\
 & & & 1 & -C3 & -1 & -C3 & & & & & & H3 & -C4 \\
 & & & & 1 & -C1 & 1 & C1 & & & * & Q & = & -C2 \\
 & & & & & 1 & -C3 & -1 & -C3 & & & & H4 & -C4 \\
 & & & & & & 1 & -C1 & 1 & C1 & & & Q5 & -C2 \\
 & & & & & & & 1 & -C3 & -1 & -C3 & & H5 & -C4 \\
 & & & & & & & & 1 & -C1 & 1 & C1 & Q6 & -C2 \\
 & & & & & & & & & 1 & -C3 & -1 & -C3 & H6 & -C4 \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & Q7 & b3 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & H7 & b4
 \end{array}$$

donde las constantes C_i y b_i provienen de las ecuaciones (107), (110) y (111) y pueden ser diferentes para cada sección. Nótese que, solo para fines ilustrativos, la ecuación (112) representa dos condiciones de borde con tanque de carga constante, donde $H1=b1$ y $H7=b4$.

El algoritmo híbrido propuesto, puede resumirse como sigue:

- a) aplicar la ecuación (107) para todos los nudos, calculando C_c y B_c de las características físicas y del tiempo anterior. Q_{ext} se calcula a partir de una ecuación del tipo constitutivo (estanque hidroneumático, tanque lineal, de carga constante, nudo con consumo fijo o variable, etc.), lo que puede implicar la resolución de una ecuación no-lineal (mediante Newton). Calcular los coeficientes C_i y b_i del sistema (112).
- b) Resolver la ecuación (112) para cada tramo, aplicando el algoritmo de Thomas o de "barrido doble"
- c) Guardar Q^{k+1} y H^{k+1} , incrementar el tiempo en un intervalo.

d) Repetir la secuencia desde el paso a), hasta completar el tiempo de simulación pre - especificado.

El algoritmo híbrido propuesto compite favorablemente con el método de las características en los casos siguientes:

- en redes de conectividad compleja y de gran tamaño.
- cuando en el método de las características es necesario realizar interpolaciones, las que degradan la calidad de sus resultados. El método propuesto no requiere interpolaciones.
- cuando se tienen condiciones de frontera complejas.

3.4 METODO DE LA TRASMITANCIA HIDRAULICA³

Se presenta un nuevo método de análisis de redes de tuberías, el método de la Matriz de Transmitancia Hidráulica el cual simplifica los algoritmos reduciendo la longitud de los programas, el tiempo de ejecución y los consumos de memoria. Los vectores y matrices no se calculan por medio de operaciones matriciales sino ensamblando propiedades de los elementos de una forma muy similar a la utilizada en el método de la rigidez para el análisis estructural.

En los últimos cincuenta años se ha establecido que los métodos de corrección de caudales son los más apropiados para el análisis del estado estable de redes de tuberías. La experiencia ha demostrado que los métodos de corrección de cabezas piezométricas en los nodos tienen mala convergencia. Aún cuando son más fáciles de formular y trabajar, su utilización no se recomienda.

LA MATRIZ DE TRANSMITANCIA HIDRAULICA

La sumatoria del lado izquierdo de la ecuación (69) puede separarse en dos sumatorias:

$$H_{j_{k+1}} \sum \frac{1}{m_{ij_k}} - \sum \frac{1}{m_{ij_k}} = \sum \frac{1}{m_{ij_k}} - \Delta Q_{i_k} \quad (113)$$

Los términos de la segunda sumatoria asociados con una tuberías que conecten nodos de cabeza desconocida con nodos de cabeza conocida pueden pasarse a la derecha, puesto que $H_{j_{k+1}}$ es conocido. Si se definen:

$$a_{ij_k} = - \frac{1}{m_{ij_k}} \quad (114)$$

$$a_{ij_k} = \sum \frac{1}{m_{ij_k}} = -\sum a_{ij_k} \quad (115)$$

$$c_{i_k} = \sum \frac{1}{m_{ij_k}} - \Delta Q_{i_k} \quad (116)$$

La ecuación (113) representa un conjunto de ecuaciones lineales de la forma:

$$[A]_k H_{k+1} = C_k \quad (117)$$

Es posible definir una matriz local de transmitancia que relaciona cambios en la cabeza del nodo con cambios en el balance de masas a través del elemento ij:

$$\begin{bmatrix} \Delta M_i \\ \Delta M_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ m_{ij_k} & m_{ij_k} \\ 1 & 1 \\ m_{ij_k} & m_{ij_k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta H_{i_k} \\ \Delta H_{j_k} \end{bmatrix} \quad (118)$$

Donde:

ΔH_{i_k} es el cambio en la cabeza piezométrica del nodo i

ΔH_{j_k} es el cambio en la cabeza piezométrica del nodo j

ΔM_i es el cambio en el balance de caudales del nodo i debido a cambios en los nodos i y j.

ΔM_j Es el cambio en el balance de caudales del nodo j debido a cambios en los nodos i y j.

La Matriz General de Transmitancia $[A]_k$ puede ser generada, como la matriz de rigidez estructural, ensamblando matrices locales. La tubería ij genera dos elementos iguales y negativos en las localizaciones ij y ji de la matriz $[A]_k$. Los elementos aii y ajj de la diagonal se incrementan en la misma cantidad. El resultado es una matriz simétrica y positivamente definida. Por esta razón pueden utilizarse algoritmos más rápidos y eficientes.

El concepto de la transmitancia hidráulica puede aplicarse directamente para incluir en la matriz los elementos no simétricos. No se requiere algebra matricial para generar la matriz $[A]_k$ ni el vector C_k . Todos los valores pueden ser calculados añadiendo propiedades de los elementos a medida que se recorre, sin ningún orden especial, el

archivo de elementos de la red: Este proceso se realiza una vez por iteración.

Los métodos de la Transmitancia Hidráulica producen una ecuación por nodo.

En el método de la Transmitancia Hidráulica se satisfacen también el balance de masas. Sin embargo, la influencia de la no linealidad de todos los elementos aparece dos veces en el sistema de ecuaciones, en la ecuación de balance de masas para cada uno de los nodos extremos.

La formulación del método de la Transmitancia Hidráulica es muy similar a la del Método de Newton-Raphson de corrección de cabezas piezométricas. Sin embargo sus características de convergencia se aproximan mucho más a las de los métodos de corrección de caudales. La utilización de la ecuación (113) para el cálculo de los caudales a partir de las nuevas cabezas garantiza en todo momento el balance de masas en los nudos. El método de Newton-Raphson utiliza la ecuación (21) para el cálculo de los caudales, haciendo que se cumplan las ecuaciones de energía a lo largo de las trayectorias y circuitos. Es por ello una aproximación híbrida a la solución: Las cabezas se calculan para corregir el balance de masas suponiendo comportamiento lineal; posteriormente los caudales se calculan con la ecuación no lineal para satisfacer las ecuaciones de trayectorias.

El método de la Transmitancia Hidráulica muestra las siguientes ventajas cuando se compara con otros métodos normalmente utilizados en el análisis de redes:

1. El número de ecuaciones es igual al número de nudos con carga desconocida en la red. El método de la Teoría lineal tiene una ecuación adicional para cada circuito o trayectoria. Sin embargo, la información procesada es en esencia la misma.
2. La matriz de coeficientes lineales es simétrica y muy dispersa. Ello permite un mejor manejo de la memoria del computador así como el uso de algoritmos más rápidos y eficientes para la solución del sistema de ecuaciones.

3. No es necesario definir una distribución inicial de caudales. Inicialmente se encuentra una distribución que satisface el balance de masas resolviendo el sistema con un exponente x unitario.
4. No es necesario definir circuitos o trayectorias. Esto hace más sencillo y rápido el análisis incremental de la malla (Adición o remoción de nuevos elementos).
5. Las secciones de la red que no pertenecen a circuitos o trayectorias son analizadas directamente.
6. Al final del proceso se obtienen las cabezas piezométricas de todos los nodos. Otros métodos requieren el cálculo final de las cabezas; las secciones abiertas de la red pueden ser difíciles de analizar por cuanto que no pertenecen a ningún circuito o trayectoria.
7. El método es autocorrectivo; los errores de redondeo no se integran desviando la solución final.
8. El método exhibe una convergencia por lo menos similar que la de los métodos de la Teoría Lineal y de Ajuste Simultáneo de Trayectorias. Sin embargo se cree que su convergencia puede ser mejor debido a que se incluye más información hidráulica de la red en el sistema de ecuaciones simultáneas.

IV EJEMPLOS DE APLICACION

Ahora que se tienen conocimientos de como obtener los gastos y las cargas piezométricas de un sistema de tuberías, se verá lo útil que son estos métodos para los dos estudios que a continuación se presentan:

El primer ejemplo es un estudio realizado para conocer la calidad del agua en una red de agua potable, estudio realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua¹⁷ y el segundo, es una aplicación a un macrosistema de distribución de agua potable en el valle de Cuautitlán- Texcoco¹¹.

La calidad del agua potable dentro de una red de distribución cambia durante el recorrido desde la planta de potabilización hasta el consumidor. Para predecir las variaciones de la calidad del agua en redes de distribución, en los últimos años se han desarrollado modelos matemáticos, que, generalmente, se componen de dos partes:

- 1) Modelo hidráulico que calcula los gastos y las velocidades en los tramos de la red.
- 2) Modelo físicoquímico que calcula las concentraciones de las sustancias modeladas en los puntos de la red usando los resultados del modelo hidráulico.

Si por alguna razón en una tubería se suspende el servicio, es posible que se infiltre agua contaminada de las aguas subterráneas o de alcantarillados cercanos, estas infiltraciones se controlan manteniendo en la red la presión señalada en las normas de técnicas de diseño. El modelo hidráulico puede predecir en que parte de la red es posible que se obtengan bajas presiones y así definir las zonas susceptibles de ser contaminadas y tomar las medidas necesarias para evitarlo.

El modelo hidráulico llamado Análisis hidráulico, usado en este estudio de calidad tiene como datos de entrada a los siguientes:

- a) Tuberías (tramos de la red): diámetro, longitud y coeficiente de pérdidas de carga.
- b) Nodos: elevación y demanda de agua

- c) Tanques: nivel de agua (se considera constante en un análisis de flujo permanente)
- d) Bombas: curvas gasto-carga, nivel de succión y pérdidas de carga menores

En base a estos datos se forma un sistema de ecuaciones no lineales de balance de los gastos en los nudos, que tiene como incógnitas las cargas de los mismos. El sistema se soluciona iterativamente por el método de Newton Raphson. En cada iteración se soluciona un sistema de ecuaciones lineales usando técnicas de matrices porosas. Posteriormente se calculan los gastos en los tramos. El programa Análisis hidráulico arroja una serie de resultados, de los cuales el modelo de calidad del agua usa los datos siguientes: gastos en los tramos, sentido de los gastos y velocidad.

Se hace comparación de resultados obtenidos con los programas presentados en este trabajo con los obtenidos del Análisis hidráulico utilizado en el estudio de calidad mencionado utilizando la red presentada en la figura 21.

Un ejemplo más de las aplicaciones de estos métodos es la descripción de los estudios realizados durante el proceso de planeación del denominado macrosistema de distribución de agua potable en la zona conurbada del valle de Cuauhtitlán-Texcoco en el Estado de México.

La gran extensión del valle Cuauhtitlán-Texcoco conurbado al Distrito Federal requiere de un sistema primario de distribución de agua potable que permita el abastecimiento de una manera flexible en cuanto a las entregas de agua en bloque, al suministro interno y a la regularización y distribución en cada una de las zonas que lo forman.

Con las condiciones de proyecto, de revisión y de las alternativas de funcionamiento planteadas para este estudio en especial, se realizó el dimensionamiento geométrico de los conductos de la red primaria y posteriormente, se procedió a conocer su funcionamiento hidráulico. Con la distribución de gastos por alimentar se propuso el diámetro de los conductos, que se aceptó o no según los resultados del funcionamiento hidráulico.

Para el dimensionamiento geométrico se utilizó el método denominado Red Estática, que parte de la base de que por la energía

disponible en las uniones de las tuberías y el gasto que fluye en cada tubo se podrá definir el funcionamiento hidráulico de una red, requiriéndose conocer previamente los gastos de por lo menos un nivel piezométrico. El cálculo de las energías disponibles en los nudos y de los gastos de cada tramo de la red se basa en la aplicación de las ecuaciones de la energía y de la continuidad.

El diseño geométrico de los conductos del sistema primario se basó en los datos de entrada de agua a la red y de salidas a los tanques maestros. Se dimensionaron únicamente los diámetros de cada tubo, ya que sus longitudes quedaron determinadas por el proyecto de trazo de la red. Al fijar estos diámetros se tuvo el cuidado de mantener las velocidades entre 0.6 m/s y 5m/s.

La secuela de cálculo empleada para la condición de proyectos y la revisión de las alternativas de funcionamiento fue la siguiente:

- a) Se calcularon los gastos conducidos en cada tubo de la red primaria de acuerdo con los caudales de entrada (oferta) y de salida (demanda), revisando que la suma de entradas y salidas del sistema fuera igual a cero.
- b) Con los límites de velocidad especificados se asignaron los diámetros de los tubos, ajustándolos al valor comercial inmediato superior al obtenido.
- c) Mediante el uso de un programa de computadora se conoció su funcionamiento hidráulico, es decir, las cotas piezométricas y las cargas disponibles en cada tramo.
- d) Se revisó que las cargas disponibles fueran de una magnitud tal que garantizara el suministro de agua a todos y cada uno de los tanques maestros; en caso contrario, se modificaron algunos diámetros y se repitió el proceso.
- e) En los puntos de la red en que se tenían cargas disponibles excesivamente altas, se propusieron rompimientos de presión a fin de evitar velocidades mayores a las especificadas y de reducir las cargas de trabajo en los conductos, lo que implicó un decremento en los costos de éstos.

El análisis para la condición de proyectos se realizó simultáneamente al de la alternativa de rugosidad alta, a fin de verificar el abastecimiento a tanques maestros y así fijar los diámetros más convenientes.

Los tramos y ramales quedaron diseñados de manera que las longitudes de tubería correspondientes a cada diámetro tuvieran las magnitudes siguientes:

Diámetro (m)	Longitud (m)	Diámetro (m)	Longitud (m)
2.44	9730	1.07	10510
2.29	22510	0.91	19620
2.13	19830	0.76	36580
1.83	1700	0.61	14840
1.68	15560	0.51	29980
1.52	26680	0.46	12450
1.37	10550	0.41	4040
1.22	9740	0.36	7800
		0.25	6760
		total	258 880

Se determinó que serían necesarios 58 tanques de almacenamiento y regularización, con una capacidad total del orden de los 370 000 m³.

Se presenta un método útil para estudios de este tipo:

Es un método para calcular los gastos en los tubos de una red de abastecimiento de agua potable con nodos de carga constante que representan a los tanques de regulación. Los algoritmos convergen rápidamente aun para condiciones iniciales muy diferentes de la solución.

El procedimiento que se presenta a continuación, aún cuando se ha elaborado para atacar el problema de abastecimiento de agua potable en la ciudad de México, pueden ser utilizados en todos aquellos casos en que se desee analizar una red de distribución, su ampliación y su interconexión con diversos sitios de suministro, así como la jerarquización de los proyectos de abastecimiento.

Este método permite analizar una red primaria de distribución de agua potable. En el caso de que la alimentación sea desde tanques con carga constante, el método proporciona el gasto que se debe suministrar a

cada tanque. Se intentaron varios métodos de solución, encontrándose que uno de Newton-Raphson modificado era el de convergencia más rápida y segura.

Para suministrar el agua requerida, es necesario establecer una serie de proyectos de captación y conducción.

El problema que a nuestro estudio interesa consiste en determinar los niveles piezométricos en cada uno de los nodos de la red, dada esta, es decir, conocida la geometría de la red, los diámetros de cada tramo y la rugosidad, así como las extracciones de agua de la red, que se suponen como gastos concentrados en los nodos. Se deben satisfacer condiciones de frontera, que en el caso de la red de la ciudad de México son ciertos niveles piezométricos fijos, nueve en total, correspondientes a tanques con carga constante. El problema queda resuelto si se soluciona la ecuación (7). Habrá n ecuaciones de estas, una para cada nudo donde la carga sea desconocida.

Este sistema implica el cumplimiento del principio de continuidad en cada nudo. El método seguido para resolverlo consistió en transformar las ecuaciones para que las incógnitas sean los niveles piezométricos en los nudos, usando una fórmula de fricción que en este caso fue la de Hazen-Williams:

$$Q = C D^{2.63} S^{0.54} \quad (119)$$

Para un tramo dado, tanto la longitud como el diámetro son constantes, y la fórmula queda

$$Q_{ij} = C_{ij} |H_i - H_j|^{0.54} \quad (120)$$

Es necesario introducir una convención de signos, y aquí se escogió el positivo cuando el gasto va de j a i

$$Q_{ij} = C_{ij} \frac{(H_j - H_i)}{|H_j - H_i|^{0.46}}$$

El sistema quedará de esta manera

$$\sum Q_{ij} = C_{ij} \frac{(H_j - H_i)}{|H_j - H_i|^{0.46}} + Q_i = 0 \quad (121)$$

formado por n ecuaciones con las n incógnitas H_1, \dots, H_n ; j puede tomar valores de 1 a m, los correspondientes a los nudos conectados al i, siendo m el número de los nudos, incluyendo los de carga constante.

El sistema no es lineal y se requiere utilizar algún método iterativo para resolverlo. El de Newton-Raphson modificado es el que da mejores resultados, pues no se tuvieron problemas de convergencia y esta fue bastante rápida.

El sistema de ecuaciones es:

$$\begin{aligned} f_1(H_1, \dots, H_n) &= 0 \\ f_2(H_1, \dots, H_n) &= 0 \\ &\dots\dots\dots \\ f_n(H_1, \dots, H_n) &= 0 \end{aligned} \quad (122)$$

Para resolverlo se dan valores iniciales ${}_1H_i$ a las incógnitas, con lo que se tiene el vector

$${}_1\overline{H} = ({}_1H_1, {}_1H_2, \dots, {}_1H_n) \quad (123)$$

Se calcula el jacobiano de las funciones f_j , es decir

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial H_1} & \frac{\partial f_1}{\partial H_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial H_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial H_1} & \frac{\partial f_2}{\partial H_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial H_n} \\ \frac{\partial f_n}{\partial H_1} & \frac{\partial f_n}{\partial H_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial H_n} \end{vmatrix} \quad (124)$$

y los valores de las funciones f_j para los valores H_i supuestos:

$$f_j = \overline{f_j(H)}$$

El método clásico de Newton-Raphson consiste en corregir los valores supuestos inicialmente con los valores ΔH obtenidos al resolver el sistema lineal

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial H_1} & \frac{\partial f_1}{\partial H_2} \\ \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial H_1} & \frac{\partial f_n}{\partial H_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta H_1 \\ \dots \\ \Delta H_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ \dots \\ f_n \end{bmatrix} \quad (125)$$

del siguiente modo

$${}_2H_i = {}_1H_i + {}_1\Delta H \quad (126)$$

y repetir el procedimiento

$${}_{k+1}H_i = {}_kH_i + {}_k\Delta H \quad (127)$$

hasta que los valores de f_j valgan cero o sean menores que la aproximación deseada.

Sin embargo, este método conduce frecuentemente a una convergencia muy lenta y muchas veces incluso es divergente, dependiendo de los valores iniciales que se propongan. La modificación introducida consiste en corregir los valores de H_i en cada iteración del modo siguiente

$${}_{k+1}H_i = {}_kH_i + \alpha {}_k\Delta H \quad (128)$$

donde α se escoge de tal manera que la función

$$F = \sum f_j^2 (H_i)$$

sea mínima.

La interpretación geométrica del procedimiento es esta: los valores H_{ik} definen un punto en un espacio n-dimensional, en la iteración siguiente se va a otro punto en la dirección que marca el vector ${}_k\Delta H_i$, pero no hasta su extremo como en el método clásico de Newton-Raphson, sino

hasta donde la función F sea mínima en esa dirección. Se puede demostrar que el vector ${}_k\Delta H_i$ marca una dirección en la que F decrece. Encontrado el nuevo punto, o sea los nuevos valores de H , se repite el proceso que terminará cuando F valga cero, lo que implica que todas las f_j valgan cero y por lo tanto el sistema original de ecuaciones estará resuelto.

Para encontrar el valor de a que hace F mínima en la dirección dada, se utilizó un método de búsqueda de Fibonacci.

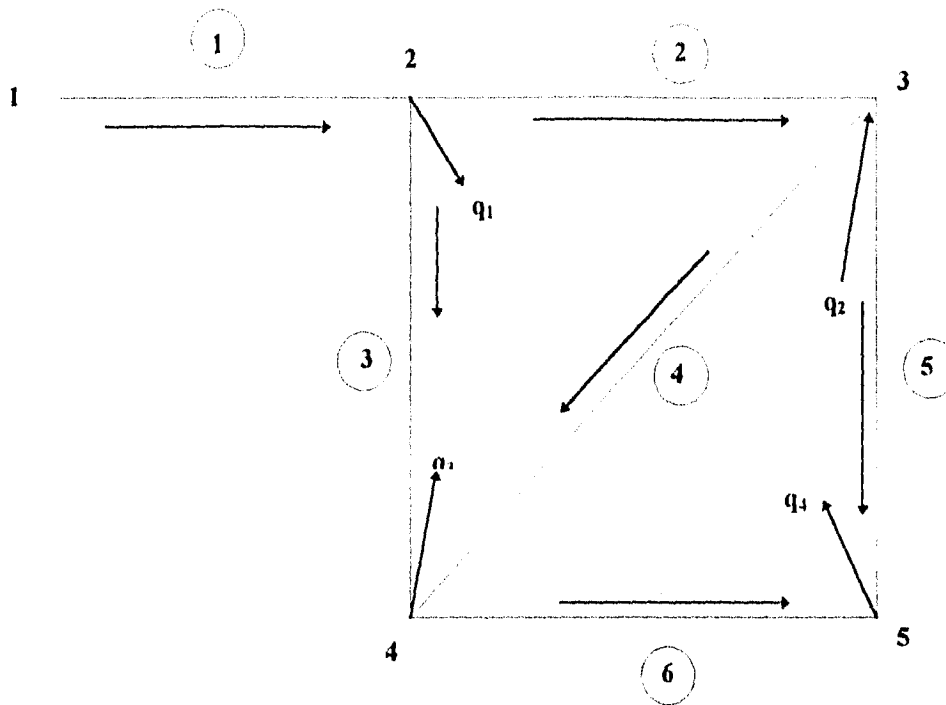
Para resolver el sistema lineal que proporciona el vector ΔH_i , se utilizó el método iterativo de Gauss-Seidel, aprovechando que la diagonal principal de la matriz es más "pesada" que los otros elementos del mismo renglón, y que la mayoría de ellos valen cero. No es conveniente un método directo de inversión de matrices, pues en un caso como el de la ciudad de México se tiene un sistema de 90 ecuaciones con 90 incógnitas, lo que requiere mucho tiempo y memoria de la computadora, al no aprovechar que en cada renglón i , solo son distintos de cero el elemento de la diagonal principal y los elementos de las columnas j de los nudos conectados al nudo i , que suelen ser tres o cuatro. Es decir, de los 90 elementos de cada renglón, aproximadamente 85 valen cero.

Con este método se obtuvo una convergencia rápida y en ningún caso hubo problemas para lograrla.⁹

**V COMPARACION DE RESULTADOS DE LAS SIGUIENTES REDES
PRESENTADAS**

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

FIGURA 19
RED DE TUBOS CERRADA



TUBO	LONGITUD (m)	DIAMETRO (m)	f
1	200	0.6	0.02
2	400	0.6	0.02
3	300	0.4	0.02
4	500	0.4	0.02
5	300	0.6	0.02
6	400	0.6	0.02

GASTOS QUE ENTRAN Y SALEN DE LA RED

NUDO	2	3	4	5	1
GASTO (m ³ /s)	0.5	-0.2	0.6	1.4	0

$H_1 = 100$ m.

**COMPARANDO RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA RED DE LA
FIGURA 19**

METODO DE CORRECCION DE CARGA

TRAMO	GASTO
1	2.2993
2	1.1797
3	0.6197
4	0.2895
5	1.0902
6	0.3095

METODO DEL ELEMENTO FINITO

TRAMO	GASTO
1	1.1865
2	0.6135
3	0.2731
4	1.1134
5	0.2866
6	2.282

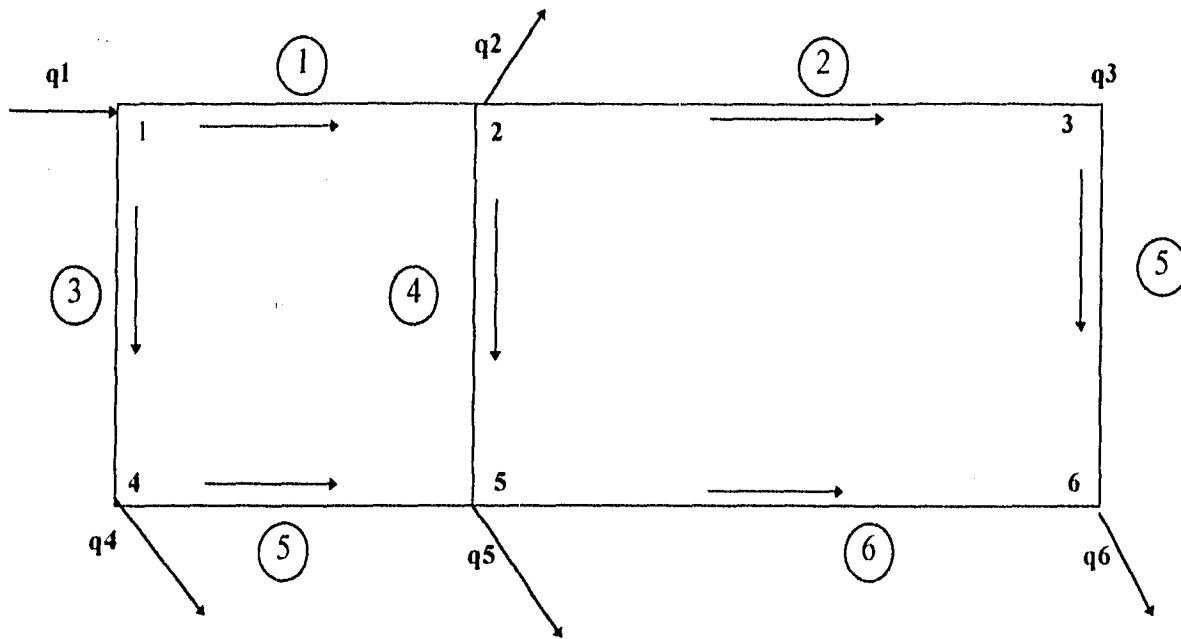
METODO DE TAYLOR MODIFICADO

TRAMO	GASTO
1	0.7674
2	1.0222
3	0.1433
4	0.8336
5	0.5712
6	2.2770

METODO DE LA TEORIA LINEAL

TRAMO	GASTO
1	2.2998
2	1.1803
3	0.6195
4	0.2914
5	1.0889
6	0.3111

FIGURA 20



TRAMO	LONGITUD(m)	DIAMETRO (m)
1	305	0.25
2	610	0.20
3	153	0.30
4	153	0.2
5	153	0.2
6	305	0.25
7	610	0.30

$f = 0.02$ para todos los tramos de la red.

GASTOS QUE ENTRAN Y SALEN DE LA RED

NUDO	1	2	3	4	5	6
GASTO (m^3/s)	-0.9477	0.00505	0	0.00631	0.00631	0.0771

**COMPARANDO RESULTADOS OBTENIDOS DE LA RED DE LA
FIGURA 20**

METODO DE CROSS

circuito 1

TRAMO	GASTO (m ³ /s)
1	0.0428
4	0.0187
6	-0.0456
3	-0.0519

circuito 2

TRAMO	GASTO (m ³ /s)
2	0.0191
5	0.0191
7	-0.058
4	-0.0187

METODO DEL ELEMENTO FINITO

TRAMO	GASTO (m ³ /s)
1	0.0437
2	0.0196
3	0.0511
4	0.0190
5	0.0196
6	0.0448
7	0.0575

METODO UTILIZANDO LA SERIE DE TAYLOR MODIFICADA

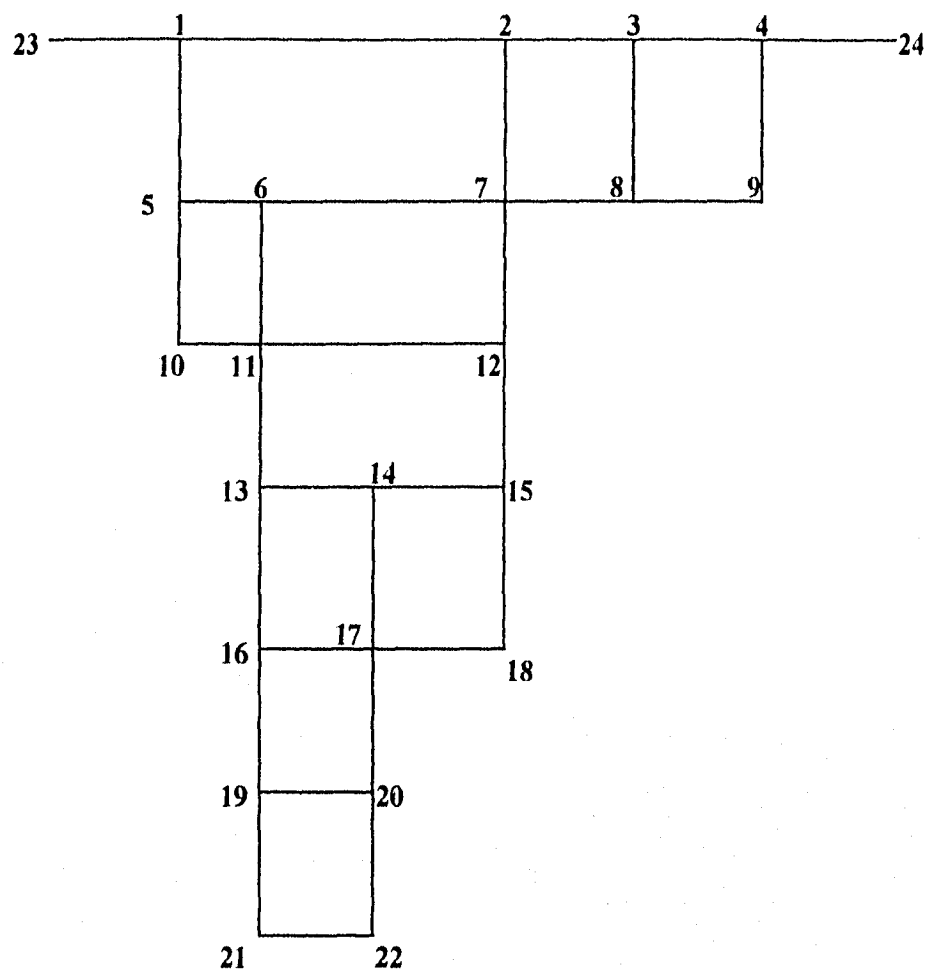
TRAMO	GASTO (m ³ /s)
1	0.0441
2	0.0203
3	0.0507
4	0.0188
5	0.0203
6	0.0444
7	0.0569

METODO DE LA TEORIA LINEAL

TRAMO	GASTO (m ³ /s)
1	0.0407
2	0.0203
3	0.0506
4	0.0187
5	0.0204
6	0.0443
7	0.0567

FIGURA 21

RED DE DISTRIBUCION CALCULADA EN EL ESTUDIO DE CALIDAD



DATOS PARA LA RED DE LA FIGURA 21

TRAMO NUMERO	NUDO INICIAL (NI)	NUDO FINAL (NF)	LONGITUD (m)	DIAMETRO (mm)	GASTO DEL NF (l/s)
1	23	1	600	1000	1493.3
2	1	2	1300	800	100
3	3	2	400	800	100
4	4	3	300	800	200
5	24	4	400	1000	200
6	1	5	400	800	100
7	5	6	500	800	99.56
8	7	6	800	800	99.56
9	2	7	400	800	64.01
10	8	7	400	800	64.01
11	3	8	400	800	200
12	9	8	300	800	200
13	4	9	400	800	200
14	5	10	400	800	200
15	10	11	500	800	100
16	6	11	400	800	100
17	11	12	800	800	100
18	7	12	400	600	100
19	11	13	300	600	200
20	13	14	300	600	200
21	15	14	500	600	200
22	12	15	300	600	200
23	13	16	300	600	100
24	17	16	300	600	100
25	14	17	300	600	100
26	18	17	500	600	100
27	15	18	300	600	100
28	16	19	200	400	100
29	19	20	300	400	100
30	17	20	200	400	100
31	19	21	300	400	000
32	21	22	300	400	100
33	20	22	300	400	100

$f = 0.02$ para todos los tramos de la red.

**RESULTADOS UTILIZANDO EL PROGRAMA BASADO EN EL METODO
PROPUESTO POR FUENTES MARILES Y SANCHEZ BRIBIESCA
PARA LA FIGURA 21.**

TRAMO NUMERO	NUDO INICIAL (NI)	NUDO FINAL (NF)	GASTO DEL TRAMO (l/s)	CARGA H _i DEL NF (m)
1	23	1	1492.1	2.24
2	1	2	351.5	1.43
3	3	2	232.5	1.43
4	4	3	714	1.54
5	24	4	1507.4	2.31
6	1	5	935	0.47
7	5	6	281	0.28
8	7	6	417.1	0.28
9	2	7	472.6	0.977
10	8	7	451.4	0.977
11	3	8	271.4	1.39
12	9	8	386.1	1.39
13	4	9	586.6	1.61
14	5	10	549.3	0.134
15	10	11	347.8	0.44
16	6	11	595.2	0.44
17	11	12	232.4	0.66
18	7	12	438.5	0.66
19	11	13	609.6	2.81
20	13	14	180.3	3.01
21	15	14	162.2	3.01
22	12	15	571.1	2.74
23	13	16	230.5	3.15
24	17	16	7.9	3.15
25	14	17	143.4	3.15
26	18	17	110.4	3.15
27	15	18	209.9	3.02
28	16	19	150.2	3.90
29	19	20	8.4	3.90
30	17	20	150.6	3.90
31	19	21	42.1	3.96
32	21	22	41.8	4.04
33	20	22	58.7	4.04

Las cargas para los nudos 23 y 24 son:

$$H_{23} = 4.44 \text{ m}$$

$$H_{24} = 3.81 \text{ m}$$

**RESULTADOS UTILIZANDO EL PROGRAMA BASADO EN EL METODO
DE LA TEORIA LINEAL PARA LA FIGURA 21**

TRAMO NUMERO	NUDO INICIAL (NI)	NUDO FINAL (NF)	GASTO DEL TRAMO (l/s)	CARGA Hi DEL NF (m)
1	1	23	-1492.7	2.03
2	2	1	-346.5	1.24
3	3	2	239.2	1.24
4	4	3	716.7	1.36
5	4	24	-1508.4	3.65
6	1	5	942.8	0.24
7	5	6	281.8	3.90
8	7	6	429	3.90
9	2	7	481.5	0.78
10	8	7	462.4	0.78
11	3	8	274	1.21
12	8	9	-389.8	1.44
13	9	4	-588.5	2.14
14	5	10	558	0.39
15	10	11	356.7	0.71
16	6	11	609.3	0.71
17	11	12	237.4	0.94
18	7	12	449.3	0.94
19	11	13	627.1	3.22
20	13	14	185	3.44
21	15	14	168.7	3.44
22	12	15	586.4	3.14
23	13	16	240	3.59
24	17	16	19.77	3.59
25	14	17	151.77	3.59
26	18	17	118.1	3.59
27	15	18	217.4	3.44
28	16	19	149	4.30
29	19	20	4.4	4.33
30	17	20	152.2	4.33
31	19	21	43.78	4.40
32	21	22	43.33	4.49
33	20	22	56.33	4.49

**RESULTADOS UTILIZANDO EL PROGRAMA BASADO EN EL METODO
DE ELEMENTO FINITO PARA LA FIGURA 21**

TRAMO NUMERO	NUDO INICIAL (NI)	NUDO FINAL (NF)	GASTO DEL TRAMO (l/s)	CARGA Hi DEL NF (m)
1	23	1	1491.6	3.27
2	1	2	334.2	2.20
3	3	2	239.4	2.20
4	4	3	718.1	2.40
5	24	4	1506.8	3.40
6	1	5	953.1	0.97
7	5	6	295.2	0.65
8	7	6	404.3	0.65
9	2	7	465.9	1.59
10	8	7	446.9	1.59
11	3	8	270.6	2.15
12	9	8	381.8	2.15
13	4	9	583.6	2.50
14	5	10	553.5	0.134
15	10	11	351.5	0.32
16	6	11	596.6	0.32
17	11	12	229.2	0.65
18	7	12	440.3	0.65
19	11	13	616.9	3.45
20	13	14	181.0	3.77
21	15	14	160.0	3.77
22	12	15	569.0	3.34
23	13	16	236.0	3.98
24	17	16	4.30	3.98
25	14	17	141.2	3.98
26	18	17	109.1	3.98
27	15	18	209.0	3.76
28	16	19	148.6	5.05
29	19	20	-8.9	5.06
30	17	20	149.3	5.06
31	19	21	40.8	5.20
32	21	22	41.2	5.35
33	20	22	58.7	5.35

Las cargas para los nudos 23 y 24 son:

$$H_{23} = 5.94 \text{ m}$$

$$H_{24} = 5.21 \text{ m}$$

**RESULTADOS OBTENIDOS DEL PROGRAMA ANÁLISIS HIDRAULICO PARA LA
FIGURA 21**

TRAMO NUMERO	NUDO INICIAL (NI)	NUDO FINAL (NF)	GASTO DEL TRAMO (l/s)
1	23	1	1492.27
2	1	2	335.36
3	3	2	245.36
4	4	3	721.13
5	24	4	1507.73
6	1	5	956.91
7	5	6	299.84
8	7	6	401.35
9	2	7	480.72
10	8	7	462.37
11	3	8	275.77
12	9	8	386.60
13	4	9	586.60
14	5	10	557.07
15	10	11	357.07
16	6	11	601.19
17	11	12	233.67
18	7	12	441.73
19	11	13	624.60
20	13	14	183.44
21	15	14	162.71
22	12	15	575.40
23	13	16	241.16
24	17	16	8.49
25	14	17	146.15
26	18	17	112.69
27	15	18	212.69
28	16	19	149.66
29	19	20	8.55
30	17	20	150.34
31	19	21	41.11
32	21	22	41.11
33	20	22	58.89

Con este ejemplo podemos apreciar que los programas basados en los métodos de la serie de Taylor modificada, de la teoría lineal y de elemento finito son tan eficaces como el que se utilizó en el análisis hidráulico, ya que comparando resultados, el porcentaje de error es mínimo.

VI CONCLUSIONES

La finalidad de este trabajo es que sea de utilidad a los estudiantes interesados en conocer las aplicaciones de las ecuaciones básicas que intervienen en el análisis de redes de tuberías.

En este trabajo se presenta un resumen de la mayoría de los métodos existentes que se utilizan en una red de tuberías, para determinar los gastos que circulan en cada tramo y las cargas existentes en cada nudo.

Según la literatura, de todos los métodos numéricos para resolver numéricamente las ecuaciones de flujo no permanente en tuberías, el método de las características es el más usado, por ser explícito y por la facilidad con que permite introducir las condiciones de borde. Sin embargo, para garantizar su estabilidad debe limitarse la magnitud del paso temporal y tiene problemas de dispersión y atenuación numéricas.

El que sigue en grado de utilización es el método de diferencias finitas implícitas, el que genera grandes sistemas de ecuaciones lineales o no lineales, dependiendo de como se linealice el término friccional; tiene la ventaja de ser estable.

En cuanto se refiere al algoritmo híbrido el autor¹² demuestra que es un método muy eficiente, con mayor flexibilidad y robustez que el método de las características ante problemas de atenuaciones numéricas y hace mención que si bien el tiempo de ejecución es del orden del doble del método de las características, evita las interpolaciones de este último, reduciendo los problemas de dispersión numérica. El método híbrido tiene restricciones en el paso de tiempo y la introducción de condiciones de borde es simple.

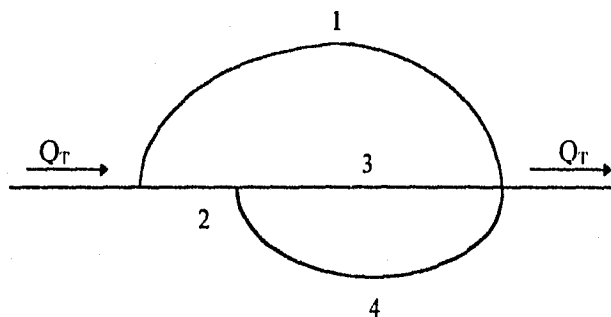
Los métodos más usados en la práctica son aquellos que resuelven las ecuaciones de flujo a presión a régimen permanente, y es por esto que en este trabajo se le dio mayor prioridad a estos métodos, sin embargo se hizo mención de aquellos que son utilizados para flujos en régimen no permanente, haciendo mención de los puntos de vistas de los autores e investigadores de estos métodos.

En este trabajo se menciona al método de la teoría lineal, el cual es fácil de aplicar en un programa de computadora, las ecuaciones lineales son resueltas por el método de sobrerelajación sucesiva.

En el programa presentado en este trabajo se enumeran los nudos que tienen carga fija primeramente, y el programa resuelve las cargas desconocidas y requiere pocas ecuaciones.

Otro método mencionado es el del elemento finito, del cual se obtiene una solución matricial que es comparada con la solución obtenida de una ecuación no lineal.

Resolviendo analíticamente la siguiente red, se encuentra el gasto que circula por cada tramo de ella; esta misma red es resuelta por los métodos numéricos de flujo a régimen permanente, para luego obtener el porcentaje de error de cada método con respecto a los resultados obtenidos analíticamente.



DATOS DE LA RED

	f	LONGITUD (m)	DIAMETRO (m)	AREA (m ²)	K
TRAMO 1	0.02	120	0.12	0.0113	25
TRAMO 2	0.02	40	0.10	0.00785	10
TRAMO 3	0.02	60	0.10	0.00785	15
TRAMO 4	0.02	80	0.10	0.00785	20

y $Q_T = 0.8 \text{ m}^3/\text{s}$

Considerando que

$$\Delta H_1 = \Delta H_2 = \Delta H_3 = \Delta H_4$$

y recordando que

$$\Delta H = K \frac{V^2}{2g}$$

donde

$$K = \frac{fL}{D}$$

y de la ecuación de continuidad se tiene

$$\begin{aligned} Q_T &= Q_1 + Q_2 \\ Q_2 &= Q_T - Q_1 \end{aligned}$$

Si primeramente se hace que

$$\Delta H_1 = \Delta H_2$$

se tiene

$$k_1 \left(\frac{Q_1}{A_1} \right)^2 = k_2 \left(\frac{Q_2}{A_2} \right)^2$$

Sustituyendo la ecuación $Q_2 = Q_T - Q_1$ en la anterior se llega a

$$k_1 \left(\frac{Q_1}{A_1} \right)^2 = k_2 \left(\frac{Q_T - Q_1}{A_2} \right)^2$$

Se resuelve esta ecuación cuadrática y se obtienen los valores para Q_1 y Q_2 .

$$\begin{aligned} Q_1 &= 0.4235 \text{ m}^3/\text{s} \\ Q_2 &= 0.3765 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

De igual manera se realiza para encontrar los valores Q_3 y Q_4 . Considerando que

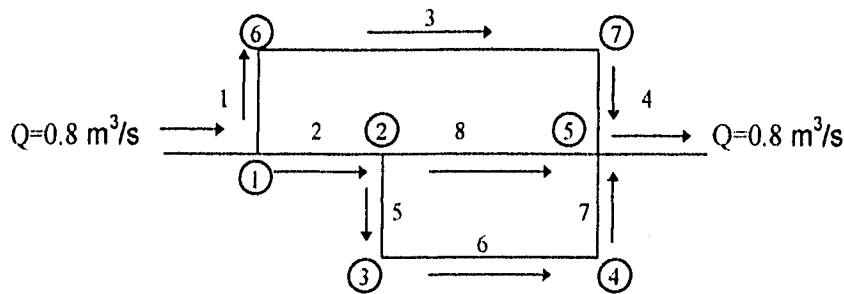
$$\begin{aligned} Q_2 &= Q_3 + Q_4 \\ Q_2 - Q_3 &= Q_4 \end{aligned}$$

Por lo tanto, resolviendo llegamos a

$$Q_3 = 0.2017 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_4 = 0.1748 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para resolver con los métodos numéricos para flujo a régimen permanente se modificó la forma de la red, tal como se presenta en la figura siguiente



Los números encerrados en un círculo corresponden a los nudos.

A continuación se presentan los resultados obtenidos por cada método, para luego presentar el porcentaje de error de cada uno, con respecto a los resultados obtenidos analíticamente.

analíticamente se obtuvo:

$Q_1 =$	$0.4235 \text{ m}^3/\text{s}$
$Q_2 =$	$0.3765 \text{ m}^3/\text{s}$
$Q_3 =$	$0.2017 \text{ m}^3/\text{s}$
$Q_4 =$	$0.1777 \text{ m}^3/\text{s}$

utilizando los métodos numéricos:

	TEORIA LINEAL	HARDY CROSS	ELEMENTO FINITO	TAYLOR MODIFICADA
Q_1	0.4169	0.4609	0.4194	0.4167
Q_2	0.383	0.3390	0.3806	0.3827
Q_3	0.2053	0.184	0.2051	0.2049
Q_4	0.1777	0.1546	0.1755	0.1774

% ERROR

TEORIA LINEAL	HARDY CROSS	ELEMENTO FINITO	TAYLOR MODIFICADA
1.55	8.83	0.968	1.6
1.72	9.96	1.088	1.65
1.78	8.77	1.68	1.58
1.02	11.55	0.4	1.48

Los más recomendables para usar serían los métodos, el de Elemento Finito, el basado en la serie de Taylor modificada y el de la teoría lineal, ya que el porcentaje de error con respecto a los valores obtenidos analíticamente, son pequeños. Se puede notar que existe más error utilizando el método de Cross.

6.1 REFERENCIAS

- 1.- Stephenson David., Pipeflow Analysis. Edit. Elsevier Amsterdam -Oxford - New York - Tokyo. 1984.
- 2.- Fuentes M.O.A. y Martínez A.P., "Introducción a los métodos numéricos aplicados a la Hidráulica". Coordinación de Investigación, 1988.
- 3.- Barrera S.F. y Camacho L.A., "Método de la Transmitancia Hidráulica para el Análisis de Redes de Tuberías" XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. 1992.
- 4.- Sotelo A. Gilberto. "Hidráulica General" Vol. I Fundamentos Edit. Limusa, 1980.
- 5.- Sánchez, J. L. "Doce Algoritmos para Resolver Problemas de Hidráulica". Instituto de Ingeniería, No. 412. Agosto de 1982.
6. Fuentes M.O. y Fuentes M.G. "Funcionamiento Hidráulico a Presión en Régimen no Permanente de una Red de Tubería". XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. 1992.
- 7.- Fuentes M.O. y Sánchez B. J. L. "Actualización de un Método para Calcular Redes de Tuberías Funcionando a Presión en Régimen Permanente", Revista Ingeniería Vol. LXI. Oct.-Dic. 1991.
- 8.- Chaudhry M.H. "Numerical Methods for Solution of Unsteady-Flow Equations", en Chaudhry M.H. y Yevjevich V. (1981) "Closed Conduit flow", Water Resources Pub., Colorado, U.S.A.

- 9.- González F. y Capella A. "Modelos para Análisis de Redes de Abastecimiento de Agua Potable". Instituto de Ingeniería, UNAM, No. 286. Junio 1971.

- 10.- Vazquez F.E. "Método de Hardy Cross en el Diseño Económico de Redes de Distribución de Agua Potable". Revista Ingeniería Hidráulica en México. Sept.-Dic. de 1990.

- 11.- Ayanegui S. y Suárez L.J.L. "Macrosistema de Distribución de Agua Potable en el Valle de Cuauhtitlán-Texcoco". Revista Ingeniería Hidráulica en México. Enero-Abril 1986.

- 12.- Salgado C.R. y Twyman Q.C. y Twyman Q.J. "Desarrollo de un Algoritmo Híbrido para el Análisis del Escurrimiento Impermanente Rápido en Redes de Tuberías a Presión". XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. 1992.

- 13.- Wood, M.D.J. and Charles, C.O.A, J. "Hydraulic Network Analysis Using Linear Theory". Hydraulics Division ASCE, July 1972, 98 (HY7).

- 14.- Rivera J.J. y González O.A. "El Método del Elemento Finito Aplicado al Diseño Hidráulico de Redes de Distribución de Agua Potable".

- 15.- Collins, A.G. and Johnson, R.L. "Finite Element Method for Water Distribution". Journal of AWWA, Vol. 67 No. 7 pp. 385-389 1975.

- 16.- Wood, D.J. and Rayes, A.G. "Reliability of Algorithms for Pipe Networks Analysis". Journal of Hydraulics Division, Vol. 107 HY10 1981 pp. 1145-1161.

- 17.- Tzatchkov G.V. y Arreguin C.F. "Modelo de Calidad del Agua en Redes de Distribución con Flujo Permanente". Revista Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XI, Núm. 1 Enero-Abril 1996.
- 18.- Salgado C.R., "Revisión de los Métodos Numéricos para el Análisis del Flujo Impermanente en Redes de Tuberías a Presión". XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. 1992.
- 19.- Lewis T. Isaac and Kevin G. Mill. "Linear Theory Methods for pipe network analysis". Journal of Hydraulics Division, Vol. 106 HY7 July 1980.
- 20.- Karney B. W. (1984), "Analysis of fluid transients in large distribution networks", Ph. D. Thesis, Universidad de British Columbia, Canada, septiembre 1984.
- 21.- Watt C. S., Boldy A.P. y Hobbs J.M.: (1980), "Combination of finite difference and finite element techniques in hydraulic transient problems", Paper B2, Third Int. Conf. on Pressure Surges, B.H.R.A., U. de Kent, Canterbury, Inglaterra.
- 22.- Hwang H.C.N., (1987); "Fundamentals of Hydraulic Engineering System". Prentice- Hall, Inc. Englewood Cliffs NJ 07632.
- 23.- Vázquez F. E. "Métodos Numéricos en Hidráulica Fundamental (8 Algoritmos Básicos)". Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- 24.- Vázquez F. E., Aplicaciones del Método de Diferencias Finitas en algunos transitorios hidráulicos. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

6.2 APENDICE

LISTADO DE PROGRAMAS

PROGRAMA BASADO EN EL METODO DE LA TEORIA LINEAL

```
5 CLS
LOCATE 5, 25: PRINT "METODO DE LA TEORIA LINEAL"
LOCATE 8, 10: PRINT "PARA UTILIZAR ESTE PROGRAMA SE
NECESITA CONOCER LOS"
LOCATE 9, 10: PRINT "SIGUIENTES DATOS:"
LOCATE 11, 10: PRINT "1.- LONGITUD(METROS) Y DIAMETRO(METROS) DE
CADA TRAMO DE LA RED."
LOCATE 12, 10: PRINT "2.- GASTO QUE INGRESA (-) O EGRESA (+) EN
CADA NUDO:"
LOCATE 13, 10: PRINT " ENUMERANDOLOS DE MANERA QUE A TODO
LOS NUDOS, SE LES "
LOCATE 14, 10: PRINT " CONSIDERE EN EL PROCESO LOS GASTOS QUE
POR ELLOS FLUYEN."
LOCATE 15, 10: PRINT "3.- EL VALOR DE LAS CARGAS FIJAS
EXISTENTES Hi (METROS)."
LOCATE 16, 10: PRINT " LOS NUDOS CON CARGAS FIJAS SON LOS
PRIMEROS EN ENUMERARSE."
LOCATE 20, 10: PRINT "CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR": AA$ =
INPUT$(1)
20 DIM C(50), Q(50), H(50), Q2(50), S2(50), S4(50), F(50), J1(50), J2(50), D(50),
X(50)
DIM J(100), FLOW(50), BB(100), D2(50), S5(50)
CLS
LOCATE 8, 10: PRINT "DATOS REQUERIDOS DE LA RED"
LOCATE 10, 10: INPUT "No. TUBOS"; P
LOCATE 11, 10: INPUT "No. NUDOS"; J
LOCATE 12, 10: INPUT "No. DE CARGAS FIJAS"; J3
LOCATE 13, 10: INPUT "VALOR DEL FACTOR DE FRICCION f"; F1
25 LOCATE 20, 10: INPUT "ESTAN CORRECTOS ESTOS DATOS S/N"; A$
IF A$ = "S" OR A$ = "s" THEN GOTO 64
IF A$ = "N" OR A$ = "n" THEN 5
BEEP: BEEP: GOTO 25
64 CLS
G = 9.8
S = 3.14159 ^ 2 * G / 8
LOCATE 3, 10: PRINT "CARACTERISTICAS DE LA TUBERIA"
FOR K = 1 TO P
LOCATE 5, 10: PRINT "TUBO"; K
LOCATE 7, 10: INPUT "NUDO INICIAL"; J1(K)
LOCATE 9, 10: INPUT "NUDO FINAL"; J2(K)
LOCATE 11, 10: INPUT "LONGITUD (m)"; X(K)
LOCATE 13, 10: INPUT "DIAMETRO (m)"; D(K)
LOCATE 15, 10: PRINT "GASTO DEL NUDO FINAL (M3/S)"
LOCATE 16, 10: INPUT "INGRESA (-); EGRESA (+)"; Q1: CLS
Q2(J2(K)) = Q1
NEXT K
30 GOSUB 2200
FOR I = 1 TO P
```

```

LIN = CSRLIN: IF LIN = 20 THEN LOCATE LIN, 10: PRINT "CUALQUIER TECLA
PARA CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 2200
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 11: PRINT I: LOCATE LIN, 21: PRINT J1(I): LOCATE LIN, 28:
PRINT J2(I)
LOCATE LIN, 40: PRINT X(I): LOCATE LIN, 54: PRINT D(I): LOCATE LIN, 63:
PRINT Q2(J2(I))
NEXT I
35 LOCATE LIN + 3, 15: PRINT "ESTAN CORRECTOS LOS DATOS S/N";
D$ = INPUT$(1): PRINT D$
IF D$ = "S" OR D$ = "s" THEN 120
IF D$ = "N" OR D$ = "n" THEN 6000
BEEP: BEEP: GOTO 35
120 FOR K = 1 TO P
  Q(K) = 3.14159 * D(K) ^ 2 / 4
  125 C(K) = S * D(K) ^ 5 / F1 / X(K)
  127 IF J2(K) <= J3 THEN 140
  130 H(J2(K)) = H(J1(K)) - 1 / C(K) * Q(K) ^ 2
  140 NEXT K
150 CLS
FOR L = 1 TO J3
  LOCATE 8, 10: PRINT "CARGA FIJA "; L
  LOCATE 11, 10: INPUT "VALOR (m)="; H(L)
NEXT L
153 GOSUB 7000
FOR I = 1 TO J3
  LIN = CSRLIN: IF LIN = 20 THEN LOCATE LIN, 10: PRINT "CUALQUIER TECLA
PARA CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 7000
  LIN = CSRLIN
  LOCATE LIN, 19: PRINT I: LOCATE LIN, 40: PRINT H(I)
NEXT I
155 LOCATE LIN + 3, 15: PRINT "ESTAN CORRECTOS LOS DATOS S/N";
D$ = INPUT$(1): PRINT D$
IF D$ = "S" OR D$ = "s" THEN 200
IF D$ = "N" OR D$ = "n" THEN 7100
BEEP: BEEP: GOTO 155
200 CLS
W = 1.3
T0 = .001
T1 = .001
N1 = 200
N2 = 0
N0 = SQR(J) + 200
N3 = 0
FOR I = 1 TO N0
  N2 = N2 + 1
  FOR K = 1 TO J: 'NEW H BY SOR
    S2(K) = 0
  NEXT K
FOR K = 1 TO P

```



```

S2(J1(K)) = S2(J1(K)) + C(K) / ABS(Q(K))
S2(J2(K)) = S2(J2(K)) + C(K) / ABS(Q(K))
NEXT K
FOR K = 1 TO N1
  C2 = 0
  S3 = 0
  N3 = N3 + 1
  IF J3 + 1 > J THEN 480
  FOR L = J3 + 1 TO J
    S4(L) = 0
    FOR m = 1 TO P
      IF J1(m) <> L THEN 390
      380 S4(J1(m)) = S4(J1(m)) + C(m) / ABS(Q(m)) * H(J2(m))
      390 IF J2(m) <> L THEN 410
      400 S4(J2(m)) = S4(J2(m)) + C(m) / ABS(Q(m)) * H(J1(m))
      410 NEXT m
      420 D2(L) = H(L)
      430 H(L) = H(L) * (1 - W) + W * (S4(L) - Q2(L)) / S2(L)
      440 C2 = C2 + ABS(H(L) - D2(L))
      450 S3 = S3 + 1
      460 NEXT L
      470 IF C2 / S3 <= T1 THEN 500
      480 NEXT K
      500 FOR K = 1 TO P: 'NEWS FLOWS
      510 S5(K) = Q(K)
      520 Q(K) = C(K) / ABS(Q(K)) * (H(J1(K)) - H(J2(K)))
      530 IF I = 1 THEN 550
      540 Q(K) = .5 * (Q(K) + S5(K))
      550 NEXT K
      560 C3 = 0: 'CHECK TOLERANCE
      570 FOR K = 1 TO P
      580 C3 = C3 + ABS(F1 - ABS(H(J1(K)) - H(J2(K)))) / Q(K) ^ 2 * C(K) * F1
      590 NEXT K
      600 IF (C3 / P) <= T0 THEN 630
      NEXT I
      630 CLS
      GOSUB 8000
      FOR I = 1 TO P
      LIN = CSRLIN
      IF LIN = 21 THEN LOCATE LIN, 5: PRINT "CUALQUIER TECLA PARA
      CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 8000
      LIN = CSRLIN
      LOCATE LIN, 11: PRINT I: LOCATE LIN, 18: PRINT J1(I): LOCATE LIN, 25:
      PRINT J2(I)
      LOCATE LIN, 34: PRINT X(I)
      LOCATE LIN, 47: PRINT D(I): LOCATE LIN, 55: PRINT Q(I)
      NEXT I
      LOCATE LIN + 3, 1: PRINT "CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR": AA$ =
      INPUT$(1)
      GOSUB 9000

```

```

FOR I = 1 TO J
LIN = CSRLIN: IF LIN = 21 THEN LOCATE LIN, 5: PRINT "CUALQUIER TECLA
PARA CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 9000
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 34: PRINT I: LOCATE LIN, 44: PRINT ABS(H(I))
NEXT I
615 LOCATE LIN + 1: PRINT "DESEA IMPRESION DE RESULTADOS S/N";
C$ = INPUT$(1): PRINT C$
IF C$ = "N" OR C$ = "n" THEN 620
IF C$ = "S" OR C$ = "s" THEN 650
BEEP: BEEP: GOTO 615
620 LOCATE 23, 5: PRINT "ALGUN OTRO CALCULO S/N";
B$ = INPUT$(1): PRINT B$
IF B$ = "N" OR B$ = "n" THEN 640
IF B$ = "S" OR B$ = "s" THEN 5
BEEP: BEEP: GOTO 620
640 CLS : LOCATE 12, 30: PRINT "FIN DEL PROGRAMA"
FOR MGS = 1 TO 2000: NEXT MGS: CLS : END
650 CLS
GOSUB 10000
FOR I = 1 TO P
LIN = CSRLIN
IF LIN = 21 THEN LOCATE LIN, 5: PRINT "CUALQUIER TECLA PARA
CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 10000
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 11: PRINT I: LOCATE LIN, 18: PRINT J1(I): LOCATE LIN, 25:
PRINT J2(I)
LOCATE LIN, 34: PRINT X(I)
LOCATE LIN, 47: PRINT D(I): LOCATE LIN, 55: PRINT Q(I)
NEXT I
LOCATE LIN + 3, 1: PRINT "CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR": AA$ =
INPUT$(1)
GOSUB 10100
FOR I = 1 TO J
LIN = CSRLIN: IF LIN = 21 THEN LOCATE LIN, 5: PRINT "CUALQUIER TECLA
PARA CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 10100
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 20: PRINT I: LOCATE LIN, 44: PRINT ABS(H(I))
NEXT I
GOTO 620
2200 CLS
LOCATE 3, 30: PRINT "  DATOS"
LOCATE 5, 10: PRINT "TRAMO   NI   NF   LONGITUD   DIAMETRO
GASTO"
LOCATE 6, 10: PRINT "                                DEL NF"
RETURN
6000 LOCATE LIN + 5, 15: INPUT "TRAMO POR CORREGIR"; K
CLS : LOCATE 10, 10: INPUT "NUDO INICIAL"; J1(K)
LOCATE 12, 10: INPUT "NUDO FINAL"; J2(K)
LOCATE 14, 10: INPUT "LONGITUD (m)"; X(K)

```

```

LOCATE 16, 10: INPUT "DIAMETRO (m)"; D(K)
LOCATE 18, 10: PRINT "GASTO DEL NUDO FINAL (M3/S)"
LOCATE 19, 10: INPUT "INGRESA (-); EGRESA (+)"; Q1: CLS
Q2(J2(K)) = Q1
GOTO 30
7000 CLS
LOCATE 3, 30: PRINT "CARGAS FIJAS"
LOCATE 5, 10: PRINT "    NUDO          CARGA"
LOCATE 6, 10: PRINT "                (m)"
RETURN
7100 LOCATE LIN + 5, 15: INPUT "CARGA A CORREGIR (1,2..)"; L
CLS : LOCATE 5, 10: PRINT "CARGA FIJA "; L
LOCATE 7, 10: INPUT "VALOR (m)="; H(L)
GOTO 153
8000 CLS : LOCATE 3, 31: PRINT "R E S U L T A D O S"
LOCATE 5, 5: PRINT "TRAMO    NI    NF    LONGITUD    DIAMETRO
GASTO"
LOCATE 6, 5: PRINT "                (m)    (m)    m3/s"
RETURN
9000 CLS
LOCATE 3, 30: PRINT "CARGAS EN LOS NUDOS"
LOCATE 7, 33: PRINT "NUDO          CARGA"
LOCATE 8, 33: PRINT "                (m)"
RETURN
10000 CLS
PRINT "          METODO DE LA TEORIA LINEAL APLICADO A REDES DE
TUBERIAS"
PRINT "          RESULTADOS"
PRINT
PRINT " TRAMO  N1  N2  LONGITUD  DIAMETRO  GASTO"
PRINT "                (m)    (m)    (m3/s)"
RETURN
10100 CLS
PRINT "          CARGAS EN LOS NUDOS"
PRINT "          NUDO          CARGA"
PRINT "                (m)"
RETURN

```

PROGRAMA BASADO EN EL METODO DE LA SERIE DE TAYLOR
MODIFICADA

```
CLS
LOCATE 3, 15: PRINT "METODO PARA REDES DE TUBERIAS EN REGIMEN
PERMANENTE"
LOCATE 6, 10: PRINT "ESTE PROGRAMA ESTA BASADO EN EL METODO
PROPUESTO POR LOS"
LOCATE 7, 10: PRINT "INGENIEROS OSCAR FUENTES MARILES Y JOSE
LUIS SANCHEZ"
LOCATE 8, 10: PRINT "BRIBIESCA, INVESTIGADORES DEL INSTITUTO
DE INGENIERIA,"
LOCATE 9, 10: PRINT "DE LA UNAM."
LOCATE 10, 10: PRINT "ES UN METODO SENCILLO APLICABLE A
REDES CERRADAS Y"
LOCATE 11, 10: PRINT "ABIERTAS. PARA UTILIZAR ESTE PROGRAMA SE
NECESITA CONOCER LOS "
LOCATE 12, 10: PRINT "SIGUIENTES DATOS:"
LOCATE 13, 10: PRINT "1.- LONGITUD (m) Y DIAMETRO (m) DE CADA
TRAMO DE LA RED."
LOCATE 14, 10: PRINT "2.- GASTO SUPUESTO EN CADA TRAMO
(m3/s)."
LOCATE 15, 10: PRINT "3.- GASTO QUE INGRESA (-) O EGRESA (-) A LA
RED(m3/s)."
LOCATE 16, 10: PRINT "4.- Y EL VALOR DE LAS CARGAS FIJAS
EXISTENTES (m)."
LOCATE 17, 10: PRINT " LOS NUDOS CON CARGAS FIJAS SON LOS
ULTIMOS EN ENUMERARSE."
LOCATE 21, 10: PRINT " CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR": AA$ =
INPUT$(1)
5 CLS
LOCATE 1, 20: PRINT "METODO APLICANDO SERIE DE TAYLOR
MODIFICADA"
DIM A(50, 50), L(50), Q(50), CT(50), H1(50), C1(50), NUMH(50), CARGA(100,
100)
DIM C2(50), N1(50), N2(50), PC1(50), PC(50), B(50), HX(50), CC(50)
DIM HB(50), D(50), NT(50), NU(50, 50), T(50, 50), X1(50), RH(150), RH1(150)
DIM Q1(50), HR(50), HR1(50), K(50), NK(100), NH(100, 100), NF(100)
DIM TB(100), NJ(50), TI(50), TR(50), RT(100)
W = 1.25
M = 2
F = .02
TOL = .001
10 LOCATE 5, 20: INPUT "NO. DE TUBOS"; NT
LOCATE 6, 20: INPUT "NO. DE NUDOS CON CARGAS DESCONOCIDAS"; NN
15 LOCATE 16, 20: PRINT "ESTAN CORRECTOS LOS DATOS S/N"
E$ = INPUT$(1): LOCATE 16, 55: PRINT E$
IF E$ = "N" OR E$ = "n" THEN 10
IF E$ = "S" OR E$ = "s" THEN 20
BEEP: BEEP: GOTO 15
```

```

20 CLS
LOCATE 3, 10: PRINT "CARACTERISTICAS DE LA TUBERIA"
FOR I = 1 TO NT
LOCATE 7, 10: PRINT "TUBO "; I
LOCATE 10, 15: INPUT "LONGITUD (m)"; L(I)
LOCATE 12, 15: INPUT "DIAMETRO (m)"; D(I)
LOCATE 14, 15: INPUT "NUDO INICIAL"; N1(I)
LOCATE 16, 15: INPUT "NUDO FINAL"; N2(I)
LOCATE 18, 15: INPUT "GASTO m3/s"; Q(I): CLS
NEXT I
22 GOSUB 2200
FOR I = 1 TO NT
LIN = CSRLIN: IF LIN = 20 THEN LOCATE LIN, 10: PRINT " CUALQUIER TECLA
PARA CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 2200
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 11: PRINT I: LOCATE LIN, 21: PRINT N1(I)
LOCATE LIN, 30: PRINT N2(I): LOCATE LIN, 39: PRINT L(I)
LOCATE LIN, 53: PRINT D(I): LOCATE LIN, 64: PRINT Q(I)
NEXT I
25 LOCATE LIN + 3, 15: PRINT "ESTAN CORRECTOS LOS DATOS S/N";
D$ = INPUT$(1): PRINT D$
IF D$ = "N" OR D$ = "n" THEN 6000
IF D$ = "S" OR D$ = "s" THEN 30
BEEP: BEEP: GOTO 25
30 CLS
LOCATE 3, 10: PRINT "GASTOS QUE INGRESAN (-) O EGRESAN (+) DEL
NUDO CON GARGA DESCONOCIDA"
FOR I = 1 TO NN
LOCATE 5, 10: INPUT "No. DEL NUDO"; NJ(I)
LOCATE 7, 10: INPUT "GASTO"; TI(NJ(I)): CLS
NEXT I
35 GOSUB 4000
FOR I = 1 TO NN
LIN = CSRLIN: IF LIN = 20 THEN LOCATE LIN, 10: PRINT " CUALQUIER TECLA
PARA CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 4000
LOCATE LIN, 21: PRINT NJ(I): LOCATE LIN, 32: PRINT TI(NJ(I))
NEXT I
LIN = CSRLIN
37 LOCATE LIN + 3, 15: PRINT "ESTAN CORRECTOS LOS DATOS S/N";
D$ = INPUT$(1): PRINT D$
IF D$ = "N" OR D$ = "n" THEN 2300
IF D$ = "S" OR D$ = "s" THEN 40
BEEP: BEEP: GOTO 37
40 CLS
LOCATE 4, 10: INPUT "NUMERO DE CARGAS CONOCIDAS"; CC
FOR J = 1 TO NN + CC
LOCATE 7, 10: PRINT "NO.DE TRAMOS EN CADA NUDO"
LOCATE 9, 30: PRINT "NUDO "; J
LOCATE 9, 38: INPUT NT(J): CLS

```

```

NEXT J
42 GOSUB 6200
FOR J = 1 TO NN + CC
LIN = CSRLIN: IF LIN = 20 THEN LOCATE LIN, 10: PRINT " CUALQUIER TECLA
PARA CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 6200
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 33: PRINT J: LOCATE LIN, 45: PRINT NT(J)
NEXT J
45 LOCATE LIN + 5, 15: PRINT "ESTAN CORRECTOS LOS DATOS S/N";
D$ = INPUT$(1): PRINT D$
IF D$ = "N" OR D$ = "n" THEN 6300
IF D$ = "S" OR D$ = "s" THEN 50
BEEP: BEEP: GOTO 45
50 CLS
FOR I = 1 TO CC
LOCATE 3, 10: PRINT "CARGA"; I
LOCATE 7, 10: INPUT "NO. DEL NUDO DONDE SE ENCUENTRA LA CARGA";
CC(I)
LOCATE 9, 10: INPUT "VALOR DE LA CARGA (m)"; HB(CC(I)): CLS
NEXT I
IF CC = 0 THEN 60
55 GOSUB 7000
FOR I = 1 TO CC
LIN = CSRLIN
IF LIN = 20 THEN LOCATE LIN, 10: PRINT " CUALQUIER TECLA PARA
CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 7000
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 10: PRINT I: LOCATE LIN, 21: PRINT CC(I): LOCATE LIN, 37:
PRINT HB(CC(I))
NEXT I
57 LOCATE LIN + 3, 15: PRINT "ESTAN CORRECTOS LOS DATOS S/N";
D$ = INPUT$(1): PRINT D$
IF D$ = "N" OR D$ = "n" THEN 7100
IF D$ = "S" OR D$ = "s" THEN 60
BEEP: BEEP: GOTO 57
60 CLS
IF CC = 0 THEN GOTO 70
FOR I = 1 TO NN
LOCATE 5, 10: PRINT "AL NUDO"; I
LOCATE 5, 22: INPUT "CUANTAS CARGAS LE LLEGAN"; NUMH(I)
NEXT I
65 GOSUB 7200
FOR I = 1 TO NN
LIN = CSRLIN: IF LIN = 20 THEN LOCATE LIN, 10: PRINT " CUALQUIER TECLA
PARA CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 7200
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 17: PRINT I: LOCATE LIN, 33: PRINT NUMH(I)
NEXT I
67 LOCATE LIN + 3, 15: PRINT "ESTAN CORRECTOS LOS DATOS S/N";

```

```

D$ = INPUT$(1): PRINT D$
IF D$ = "N" OR D$ = "n" THEN 7300
IF D$ = "S" OR D$ = "s" THEN 70
BEEP: BEEP: GOTO 67
70 CLS
IF CC = 0 THEN GOTO 80
FOR I = 1 TO NN
FOR A = 1 TO NUMH(I)
LOCATE 5, 10: PRINT "QUE NO. DE CARGA LE LLEGA AL NUDO"; I
LOCATE 5, 45: INPUT CARGA(A, I)
LOCATE 7, 10: INPUT "UNIDA POR EL TRAMO No. "; TB(CARGA(A, I)): CLS
NEXT A
NEXT I
75 GOSUB 7400
FOR I = 1 TO NN
FOR A = 1 TO NUMH(I)
LIN = CSRLIN: IF LIN = 20 THEN LOCATE LIN, 10: PRINT " CUALQUIER TECLA
PARA CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 7400
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 21: PRINT I: LOCATE LIN, 34: PRINT CARGA(A, I): LOCATE LIN,
45: PRINT TB(CARGA(A, I))
NEXT A
NEXT I
77 LOCATE LIN + 3, 15: PRINT "ESTAN CORRECTOS LOS DATOS S/N";
D$ = INPUT$(1): PRINT D$
IF D$ = "N" OR D$ = "n" THEN 7500
IF D$ = "S" OR D$ = "s" THEN 80
BEEP: BEEP: GOTO 77
80 CLS
FOR K = 1 TO NN + CC
FOR L = 1 TO NT(K)
LOCATE 5, 15: PRINT "TRAMO"; L; "DEL NUDO"; K
LOCATE 7, 10: PRINT "EL NUDO"; K; "ESTA UNIDO AL TRAMO"
LOCATE 7, 40: INPUT T(L, K)
LOCATE 9, 10: PRINT "QUE ESTA UNIDO AL NUDO"
LOCATE 9, 35: INPUT NU(K, T(L, K)): CLS
NEXT L
NEXT K
85 GOSUB 7600
FOR K = 1 TO NN + CC
FOR L = 1 TO NT(K)
LIN = CSRLIN: IF LIN = 20 THEN LOCATE LIN, 10: PRINT " CUALQUIER TECLA
PARA CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 7600
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 21: PRINT K
LOCATE LIN, 40: PRINT NU(K, T(L, K))
LOCATE LIN, 60: PRINT T(L, K)
NEXT L
NEXT K

```

```

87 LOCATE LIN + 3, 15: PRINT "ESTAN CORRECTOS LOS DATOS S/N";
D$ = INPUT$(1): PRINT D$
IF D$ = "N" OR D$ = "n" THEN 7700
IF D$ = "S" OR D$ = "s" THEN 90
BEEP: BEEP: GOTO 87
90 CLS
FOR I = 1 TO NN
  HB(I) = 0
NEXT I
MGS = 1
205 FOR I = 1 TO NT
  CT(I) = .0826 * F * L(I) / (D(I) ^ 5)
  C1(I) = 1 / (M * CT(I) * ABS(Q(I)) ^ (M - 1))
NEXT I
FOR T = 1 TO NN
  B(T) = 0
NEXT T
1001 *****GENERACION DE MATRIZ *****
  FOR L = 1 TO NN
    FOR R = 1 TO NN
      A(L, R) = 0
    NEXT R, L
  FOR I = 1 TO NN
    A(I, NN + 1) = TI(I)
    FOR J = 1 TO NT(I)
      A(I, I) = A(I, I) - C1(T(J, I))
      A(I, NU(I, T(J, I))) = C1(T(J, I))
      FOR R = 1 TO NT
        IF NU(I, T(J, I)) = CC(R) THEN A(I, NU(I, T(J, I))) = 0
      NEXT R
    NEXT J
  NEXT I
  GOTO 5000
END
5000 FOR I = 1 TO NN
  IF NUMH(I) = 0 THEN B(I) = TI(I) / M: GOTO 5020
  FOR A = 1 TO NUMH(I)
    B(I) = B(I) + HB(CARGA(A, I)) * C1(T(NT(CARGA(A, I)), CARGA(A, I)))
  5010 NEXT A
  B(I) = TI(I) / M - B(I)
  5020 NEXT I
  FOR I = 1 TO NN
    S = 0
    FOR J = 1 TO NN
      IF J = I THEN 5500
      S = S + ABS(A(I, J) / A(I, I))
    5500 NEXT J
    RT(I) = S
  NEXT I

```



```

L1 = RT(1)
FOR I = 2 TO NN
  RF = L1 - RT(I)
  IF RF > 0 THEN 5700
  L1 = RT(I)
5700 NEXT I
IF L1 > 1 THEN W = .6: GOTO 5750
CLS : ' PRINT "EL SISTEMA CONVERGE"
W = 1.3
5750 FOR I = 1 TO NN
  S = 0
  FOR J = 1 TO I - 1
    IF J = I THEN 5800
    S = S - A(I, J) * X1(J)
  NEXT J
  5800 S1 = 0
  IF I = NN THEN 5850
  FOR J = I + 1 TO NN
    S1 = S1 - A(I, J) * HB(J)
  NEXT J
  5850 X1(I) = (1 - W) * HB(I) + W * (S + S1 + B(I)) / A(I, I)
  NEXT I
  RC = ABS(X1(1) - HB(1))
  RC1 = ABS(X1(1))
  FOR I = 2 TO NN
    RH(I) = ABS(X1(I) - HB(I))
    RH1(I) = ABS(X1(I))
  NEXT I
  FOR J = 2 TO NN
    RG = RH(J) - RC
    IF RG < 0 THEN 5870
    RC = RH(J)
  5870 NEXT J
  FOR RK = 2 TO NN
    RG1 = RH1(RK) - RC1
    IF RG1 < 0 THEN 5880
    RC1 = RH1(RK)
  5880 NEXT RK
  RD = RC / RC1
  IF RD < TOL THEN 6500
  FOR I = 1 TO NN
    HB(I) = X1(I)
  NEXT I
  GOTO 5750
6500 FOR I = 1 TO NN
  HB(I) = X1(I)
NEXT I
FOR I = 1 TO NT
6600 ZZ = (M - 1) * Q(I) / M

```

```

Q1(I) = C1(I) * ((HB(N1(I)) - HB(N2(I)))) + ZZ
NEXT I
CR = ABS(ABS(Q1(1)) - ABS(Q(1)))
CR1 = ABS(Q1(1))
FOR I = 2 TO NT
HR(I) = ABS(Q1(I) - Q(I))
HR1(I) = ABS(Q1(I))
NEXT I
FOR J = 2 TO NT
GR = HR(J) - CR
IF GR < 0 THEN GOTO 7660
CR = HR(J)
7660 NEXT J
FOR K = 2 TO NT
GR1 = HR1(K) - CR1
IF GR1 < 0 THEN GOTO 7710
CR1 = HR1(K)
7710 NEXT K
DR = CR / CR1
IF DR <= TOL THEN 7790
FOR I = 1 TO NT
Q(I) = Q1(I)
NEXT I
GOTO 205
7790 GOSUB 8000
FOR I = 1 TO NT
LIN = CSRLIN: IF LIN = 21 THEN LOCATE LIN, 5: PRINT "CUALQUIERA PARA
CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 8000
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 6: PRINT I: LOCATE LIN, 13: PRINT N1(I): LOCATE LIN, 20: PRINT
N2(I)
LOCATE LIN, 30: PRINT L(I)
LOCATE LIN, 42: PRINT USING "#.####"; D(I): LOCATE LIN, 55: PRINT USING "
#.####"; Q1(I)
NEXT I
LOCATE LIN + 3, 5: PRINT "CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR": AA$ =
INPUT$(1)
GOSUB 9000
FOR I = 1 TO NN + CC
LIN = CSRLIN
IF LIN = 21 THEN LOCATE LIN, 5: PRINT "CUALQUIERA PARA CONTINUAR":
AA$ = INPUT$(1): GOSUB 9000
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 34: PRINT I: LOCATE LIN, 44: PRINT ABS(HB(I))
NEXT I
515 LOCATE LIN + 3, 10: PRINT "DESEA IMPRESION DE RESULTADOS S/N";
E$ = INPUT$(1): LOCATE 16, 55: PRINT E$
IF E$ = "N" OR E$ = "n" THEN 520
IF E$ = "S" OR E$ = "s" THEN 540

```

```

BEEP: BEEP: GOTO 515
520 LOCATE 23, 5: PRINT "ALGUN OTRO CALCULO S/N";
E$ = INPUT$(1): LOCATE 16, 55: PRINT E$
IF E$ = "N" OR E$ = "n" THEN 530
IF E$ = "S" OR E$ = "s" THEN 5
BEEP: BEEP: GOTO 520
530 CLS : LOCATE 12, 30: PRINT "FIN DEL PROGRAMA"
FOR MGS = 1 TO 2000: NEXT MGS: CLS : END
540 CLS
GOSUB 10000
FOR I = 1 TO NT
LIN = CSRLIN: IF LIN = 21 THEN LOCATE LIN, 5: PRINT " CUALQUIER TECLA
PARA CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 10000
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 6: PRINT I: LOCATE LIN, 13: PRINT N1(I): LOCATE LIN, 20: PRINT
N2(I)
LOCATE LIN, 30: PRINT L(I)
LOCATE LIN, 42: PRINT D(I): LOCATE LIN, 55: PRINT USING "#.###"; Q1(I)
NEXT I
LOCATE LIN + 3, 1: PRINT "CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR": AA$ =
INPUT$(1)
GOSUB 10100
FOR I = 1 TO NN + CC
LIN = CSRLIN: IF LIN = 21 THEN LOCATE LIN, 5: PRINT " CUALQUIER TECLA
PARA CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 10100
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 25: PRINT I: LOCATE LIN, 47: PRINT USING "###.###"; ABS(HB(I))
NEXT I
GOTO 520
2200 CLS
LOCATE 3, 30: PRINT "   DATOS"
LOCATE 5, 10: PRINT "TRAMO  NUDO    NUDO    LONGITUD    DIAMETRO
GASTO"
LOCATE 6, 10: PRINT "   INICIAL    FINAL"
RETURN
2300 LOCATE LIN + 5, 10: INPUT "NUDO A CORREGIR"; I
CLS
LOCATE 6, 10: PRINT "NUDO"; I
LOCATE 7, 10: INPUT "GASTO QUE INGRESA (-) O EGRESA (+)"; TI(I)
GOTO 35
4000 CLS
LOCATE 3, 50: PRINT "   GASTOS QUE INGRESAN (-) O EGRESAN DEL
NUDO (+)"
LOCATE 5, 20: PRINT "NUDO    GASTO (m3/s)"
RETURN
6200 LOCATE 3, 25: PRINT "   No. DE TRAMOS EN CADA NUDO"
LOCATE 5, 25: PRINT "   NUDO    TRAMOS"
RETURN
6300 LOCATE LIN + 3, 10: INPUT "NUDO A CORREGIR"; J

```

```

CLS
LOCATE 9, 10: PRINT "NUDO"; J;
LOCATE 9, 18: INPUT NT(J): CLS
GOTO 42
7000 CLS
LOCATE 3, 25: PRINT "CARGAS CONOCIDAS"
LOCATE 5, 20: PRINT "CARGA VALOR (m)"
RETURN
7100 LOCATE LIN + 5, 10: INPUT "CARGA CONOCIDA A CORREGIR (la
1,2,ETC)"; I
CLS
LOCATE 5, 10: PRINT "CARGA"; I
LOCATE 7, 10: INPUT "No. DEL NUDO DONDE SE ENCUENTRA LA CARGA";
CC(I)
LOCATE 9, 10: INPUT "VALOR DE LA CARGA (m)"; HB(CC(I))
GOTO 55
7200 CLS
LOCATE 3, 50: PRINT " No. DE CARGAS QUE LLEGAN AL NUDO"
LOCATE 5, 17: PRINT "NUDO # CARGAS"
RETURN
7300 LOCATE LIN + 5, 10: INPUT "NUDO A CORREGIR"; I
CLS
LOCATE 3, 15: PRINT "NUDO"; I
LOCATE 5, 18: INPUT "CUANTAS CARGAS LE LLEGAN"; NUMH(I)
GOTO 65
7400 CLS
LOCATE 3, 10: PRINT " CARGAS QUE LLEGAN AL NUDO MEDIANTE
TRAMO"
LOCATE 5, 20: PRINT "NUDO CARGA TRAMO"
RETURN
7500 LOCATE LIN + 5, 10: INPUT "NUDO A CORREGIR"; I
CLS
LOCATE 3, 10: INPUT "CARGA CONOCIDA A CORREGIR (la 1,2,ETC)"; A
LOCATE 5, 10: PRINT "No. DE LA CARGA QUE LE LLEGA AL NUDO"; I
LOCATE 5, 49: INPUT CARGA(A, I)
LOCATE 7, 10: INPUT "UNIDA POR EL TRAMO No."; TB(CARGA(A, I))
GOTO 75
7600 CLS
LOCATE 3, 50: PRINT " NUDOS UNIDOS MEDIANTE TRAMO"
LOCATE 5, 20: PRINT "NUDO INICIAL NUDO FINAL TRAMO"
RETURN
7700 LOCATE LIN + 5, 10: INPUT "NUDO A CORREGIR"; K
CLS
LOCATE 7, 10: INPUT "QUE TRAMO SERA EL CORREGIDO (el 1§,2§,etc) DE
ESTE NUDO"; L
LOCATE 8, 10: PRINT "EN NUDO"; K; "ESTA UNIDO AL TRAMO"
LOCATE 8, 40: INPUT T(L, K)
LOCATE 9, 10: PRINT "QUE ESTA UNIDO AL NUDO"
LOCATE 9, 35: INPUT NU(K, T(L, K))

```

```

GOTO 85
6000 LOCATE LIN + 5, 15: INPUT "TRAMO POR CORREGIR ", I
CLS : LOCATE 7, 30: PRINT "TRAMO No.": I
LOCATE 10, 15: INPUT "LONGITUD (m) =": L(I)
LOCATE 12, 15: INPUT "DIAMETRO (m) =": D(I)
LOCATE 14, 15: INPUT "GASTO m3/s =": Q(I)
LOCATE 16, 15: INPUT "NUDO INICIAL =": N1(I)
LOCATE 18, 15: INPUT "NUDO FINAL =": N2(I): CLS
GOTO 22
8000 CLS : LOCATE 3, 31: PRINT "R E S U L T A D O S"
LOCATE 5, 5: PRINT "TRAMO      NI      NF      LONGITUD      DIAMETRO
GASTO"
LOCATE 6, 5: PRINT "                (m)      (m)      (m3/s)"
RETURN
9000 CLS
LOCATE 3, 30: PRINT "CARGAS EN LOS NUDOS"
LOCATE 7, 33: PRINT "NUDO      CARGA"
LOCATE 8, 33: PRINT "                (m)"
RETURN
10000 CLS
PRINT "          PROGRAMA BASADO EN EL METODO PROPUESTO POR
INVESTIGADORES"
PRINT "          DEL INSTITUTO DE INGENIERIA"
PRINT "          RESULTADOS"
PRINT
PRINT " TRAMO  N1  N2  LONGITUD  DIAMETRO  GASTO"
PRINT "                (m)      (m)      (m3/s)"
RETURN
10100 CLS
PRINT "          CARGAS EN LOS NUDOS"
PRINT "          NUDO      CARGA"
PRINT "                (m)"
RETURN

```

PROGRAMA BASADO EN EL METODO DE ELEMENTO FINITO

```
CLS
REM SEGUN EL C DE HAZEN WILLIAMS DADO VARIA LA CARGA, AUNQUE
EI
' LA VARIACION DEL GASTO NO ES MUCHA
LOCATE 3, 15: PRINT "METODO PARA REDES DE TUBERIAS A REGIMEN
PERMANENTE"
LOCATE 6, 15: PRINT "ESTE PROGRAMA ESTA BASADO EN EL METODO DE
ELEMENTO"
LOCATE 7, 15: PRINT "FINITO, DETERMINA GASTOS SIN CONOCER LAS
CARGAS EN"
LOCATE 8, 15: PRINT "LOS NUDOS. PARA UTILIZAR ESTE PROGRAMA SE
NECESITA"
LOCATE 9, 15: PRINT "CONOCER LOS SIGUIENTES DATOS:"
LOCATE 11, 15: PRINT "1.- LONGITUD (m) Y DIAMETRO (m) DE CADA TRAMO
DE LA"
LOCATE 12, 15: PRINT " RED."
LOCATE 13, 15: PRINT "2.- GASTO QUE INGRESA (-) O EGRESA (+) EN CADA
NUDO"
LOCATE 14, 15: PRINT " DE LA RED."
LOCATE 15, 15: PRINT "EN LA ENTRADA DE DATOS, EL NUMERO DE
NUDOS ES"
LOCATE 16, 15: PRINT "UNICAMENTE DE LOS QUE TIENEN CARGA
DESCONOCIDA. LOS"
LOCATE 17, 15: PRINT "NUDOS QUE TIENEN CARGAS FIJAS SE ENUMERAN
PRIMERO."
LOCATE 21, 15: PRINT "CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR": AA$ =
INPUT$(1)
DIM VR(20), VC(20), A(50, 50), L(50), Q(50), CT(50), H1(50), C1(50)
DIM C2(50), N1(50), N2(50), PC1(50), PC(50), B(50), HX(50), TI(50), RT(50)
DIM HB(50), D(50), NT(50), NU(50, 50), T(50, 50), X1(50), RH(150), RH1(150)
DIM C(50), PC11(50), HR(50), HR1(50), CC(50), BB(50), TB(50), NUMH(50)
MU = .0002: DE = 101.97: TOL = .001
5 CLS
LOCATE 3, 20: PRINT "METODO POR ELEMENTO FINITO"
LOCATE 5, 20: INPUT "NO DE TUBOS"; NT
LOCATE 6, 20: INPUT "NO. DE NUDOS (SOLO CON CARGAS
DESCONOCIDAS)"; NN
15 LOCATE 16, 20: PRINT "ESTAN CORRECTOS LOS DATOS S/N"
E$ = INPUT$(1): LOCATE 16, 55: PRINT E$
IF E$ = "N" OR E$ = "n" THEN 5
IF E$ = "s" OR E$ = "S" THEN 20
BEEP: BEEP: GOTO 15
20 CLS
CLS
LOCATE 3, 25: PRINT "CARACTERISTICAS DE LA TUBERIA"
LOCATE 4, 10: PRINT "(los nudos con cargas desconocidas se enumeran
primero)"
```

```

FOR I = 1 TO NT
LOCATE 7, 15: PRINT "TUBO"; I
LOCATE 10, 15: INPUT "LONGITUD (m) ="; L(I)
LOCATE 12, 15: INPUT "DIAMETRO (m) ="; D(I)
LOCATE 14, 15: REM INPUT "C DE HAZEN WILLIAMS ="; C(I)=100
LOCATE 16, 15: INPUT "NUDO INICIAL ="; N1(I)
LOCATE 18, 15: INPUT "NUDO FINAL ="; N2(I): CLS
NEXT I
22 GOSUB 2200
FOR I = 1 TO NT
C(I) = 100
LIN = CSRLIN: IF LIN = 20 THEN LOCATE LIN, 10: PRINT "    CUALQUIER
TECLA PARA CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 2200
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 11: PRINT I: LOCATE LIN, 18: PRINT N1(I)
LOCATE LIN, 25: PRINT N2(I): LOCATE LIN, 34: PRINT L(I)
LOCATE LIN, 47: PRINT USING "#.###"; D(I): LOCATE LIN, 57: PRINT C(I)
NEXT I
25 LOCATE LIN + 3, 15: PRINT "ESTAN CORRECTOS LOS DATOS S/N";
D$ = INPUT$(1): PRINT D$
IF D$ = "N" OR D$ = "n" THEN 6000
IF D$ = "s" OR D$ = "S" THEN 30
BEEP: BEEP: GOTO 25
30 CLS
LOCATE 3, 10: INPUT "NO. DE CARGAS CONOCIDAS"; CC
FOR I = 1 TO CC
LOCATE 5, 10: PRINT "CARGA"; I
LOCATE 7, 10: INPUT "NO. DEL NUDO DONDE SE ENCUENTRA LA CARGA";
CC(I)
LOCATE 9, 10: INPUT "VALOR DE LA CARGA (m)"; HB(CC(I)): CLS
NEXT I
IF CC = 0 THEN GOTO 40
35 GOSUB 4000
FOR I = 1 TO CC
LIN = CSRLIN
IF LIN = 20 THEN LOCATE LIN, 10: PRINT "    CUALQUIER TECLA PARA
CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 4000
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 21: PRINT CC(I): LOCATE LIN, 32: PRINT HB(CC(I))
NEXT I
37 LOCATE LIN + 3, 15: PRINT "ESTAN CORRECTOS LOS DATOS S/N";
A$ = INPUT$(1): PRINT A$
IF A$ = "N" OR A$ = "n" THEN 2300
IF A$ = "s" OR A$ = "S" THEN 40
BEEP: BEEP: GOTO 37
40 CLS
FOR J = 1 TO NN + CC
LOCATE 7, 10: PRINT "NO. DE TUBOS EN CADA NUDO"
LOCATE 9, 30: PRINT "NUDO"; J;

```

```

LOCATE 9, 38: INPUT NT(J): CLS
NEXT J
42 GOSUB 6200
FOR I = 1 TO NN + CC
LIN = CSRLIN
IF LIN = 20 THEN LOCATE LIN, 10: PRINT "    CUALQUIER TECLA PARA
CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 6200
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 33: PRINT I: LOCATE LIN, 45: PRINT NT(I)
NEXT I
45 LOCATE LIN + 3, 15: PRINT "ESTAN CORRECTOS LOS DATOS S/N ";
A$ = INPUT$(1): PRINT D$
IF A$ = "N" OR A$ = "n" THEN 6300
IF A$ = "s" OR A$ = "S" THEN 50
BEEP: BEEP: GOTO 45
50 CLS
FOR K = 1 TO NN + CC
FOR L = 1 TO NT(K)
LOCATE 7, 10: PRINT "EL NUDO"; K; "ESTA UNIDO AL TRAMO"
LOCATE 7, 40: INPUT T(L, K)
LOCATE 9, 10: PRINT " QUE ESTA UNIDO AL NUDO": LOCATE 9, 35: INPUT
NU(K, T(L, K)): CLS
NEXT L
NEXT K
55 GOSUB 7000
FOR K = 1 TO NN + CC
FOR L = 1 TO NT(K)
LIN = CSRLIN
IF LIN = 20 THEN LOCATE LIN, 10: PRINT "    CUALQUIER TECLA PARA
CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 7000
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 21: PRINT K
LOCATE LIN, 40: PRINT NU(K, T(L, K))
LOCATE LIN, 60: PRINT T(L, K)
NEXT L
NEXT K
57 LOCATE LIN + 3, 15: PRINT "ESTAN CORRECTOS LOS DATOS S/N";
A$ = INPUT$(1): PRINT A$
IF A$ = "N" OR A$ = "n" THEN 7100
IF A$ = "s" OR A$ = "S" THEN 60
BEEP: BEEP: GOTO 57
60 CLS
FOR I = 1 TO NN
LOCATE 3, 10: PRINT "GASTOS QUE INGRESAN (-) O EGRESAN (+) DEL
NUDO"
LOCATE 5, 10: PRINT "NUDO"; I,
LOCATE 7, 10: INPUT "q ="; TI(I): CLS
NEXT I
65 GOSUB 7200

```



```

FOR I = 1 TO NN
LIN = CSRLIN
IF LIN = 20 THEN LOCATE LIN, 10: PRINT "    CUALQUIER TECLA PARA
CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 7200
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 20: PRINT I: LOCATE LIN, 32: PRINT TI(I)
NEXT I
67 LOCATE LIN + 3, 15: PRINT "ESTAN CORRECTOS LOS DATOS S/N";
A$ = INPUT$(1): PRINT A$
IF A$ = "N" OR A$ = "n" THEN 7300
IF A$ = "s" OR A$ = "S" THEN 70
BEEP: BEEP: GOTO 67
70 CLS
IF CC = 0 THEN GOTO 80
FOR I = 1 TO NN
LOCATE 5, 10: PRINT "AL NUDO"; I
LOCATE 5, 22: INPUT "CUANTAS CARGAS LE LLEGAN "; NUMH(I)
NEXT I
75 GOSUB 7400
FOR I = 1 TO NN
LIN = CSRLIN
IF LIN = 20 THEN LOCATE LIN, 10: PRINT "    CUALQUIER TECLA PARA
CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 7400
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 20: PRINT I: LOCATE LIN, 34: PRINT NUMH(I)
NEXT I
77 LOCATE LIN + 3, 15: PRINT "ESTAN CORRECTOS LOS DATOS S/N";
A$ = INPUT$(1): PRINT A$
IF A$ = "N" OR A$ = "n" THEN 7500
IF A$ = "s" OR A$ = "S" THEN 80
BEEP: BEEP: GOTO 77
80 CLS
IF CC = 0 THEN GOTO 90
FOR Z = 1 TO NN
FOR R = 1 TO NUMH(Z)
LOCATE 5, 10: PRINT "QUE No. DE CARGA LE LLEGA AL NUDO"; Z
LOCATE 5, 45: INPUT CARGA(R, Z)
LOCATE 7, 10: INPUT "UNIDA POR EL TRAMO NO. "; TB(CARGA(R, Z)): CLS
NEXT R
NEXT Z
85 GOSUB 7600
FOR Z = 1 TO NN
FOR R = 1 TO NUMH(Z)
LIN = CSRLIN
IF LIN = 20 THEN LOCATE LIN, 10: PRINT "    CUALQUIER TECLA PARA
CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 7600
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 18: PRINT Z: LOCATE LIN, 27: PRINT CARGA(R, Z): LOCATE LIN,
35: PRINT TB(CARGA(R, Z))

```

```

NEXT R
NEXT Z
87 LOCATE LIN + 3, 15: PRINT "ESTAN CORRECTOS LOS DATOS S/N";
A$ = INPUT$(1): PRINT D$
IF A$ = "N" OR A$ = "n" THEN 7700
IF D$ = "s" OR D$ = "S" THEN 90
BEEP: BEEP: GOTO 87
90 REM "VALORES PROPUESTOS DE SOLUCION"
FOR I = 1 TO NN
HB(I) = 0
NEXT I
200 FOR I = 1 TO NT
Q(I) = 200000 * MU * .784 * D(I) / DE
CT(I) = 10.62 * L(I) / (D(I) ^ 4.87 * C(I) ^ 1.85)
H1(I) = CT(I) * ABS(Q(I)) ^ 1.85
C1(I) = Q(I) / H1(I)
NEXT I
201 *****GENERACION DE MATRIZ *****
250 FOR L = 1 TO NN
FOR M = 1 TO NN
A(L, M) = 0
NEXT M, L
FOR I = 1 TO NN
FOR J = 1 TO NT(I)
A(I, I) = A(I, I) - C1(T(J, I))
A(I, NU(I, T(J, I))) = C1(T(J, I))
FOR R = 1 TO NT
IF NU(I, T(J, I)) = CC(R) THEN A(I, NU(I, T(J, I))) = 0
NEXT R
NEXT J
NEXT I
FOR I = 1 TO NN
B(I) = 0
NEXT I
GOSUB 3000
510 CLS
FOR J = 1 TO NT
PC11(J) = HB(N1(J)) - HB(N2(J))
Q(J) = C1(J) * PC11(J)
PC(J) = CT(J) * ABS(Q(J)) ^ .85 * Q(J)
NEXT J
FOR I = 1 TO NT
IF ABS(PC11(I) - PC(I)) > TOL THEN 470
NEXT I
GOSUB 8000
FOR I = 1 TO NT
LIN = CSRLIN
IF LIN = 21 THEN LOCATE LIN, 5: PRINT " CUALQUIER TECLA PARA
CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 8000

```

```

LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 6: PRINT I: LOCATE LIN, 13: PRINT N1(I): LOCATE LIN, 20: PRINT
N2(I)
LOCATE LIN, 30: PRINT L(I)
LOCATE LIN, 42: PRINT USING "#.####"; D(I): LOCATE LIN, 55: PRINT USING
"#.####"; Q(I)
NEXT I
LOCATE LIN + 3, 1: PRINT "CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR": AA$ =
INPUT$(1)
GOSUB 9000
FOR I = 1 TO NN + CC
LIN = CSRLIN: IF LIN = 21 THEN LOCATE LIN, 5: PRINT "CUALQUIER TECLA
PARA CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 9000
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 34: PRINT I: LOCATE LIN, 45: PRINT ABS(HB(I))
NEXT I
515 LOCATE LIN + 1: PRINT "DESEA IMPRESION DE RESULTADOS S/N";
C$ = INPUT$(1): PRINT C$
IF C$ = "N" OR C$ = "n" THEN 520
IF C$ = "s" OR C$ = "S" THEN 540
BEEP: BEEP: GOTO 515
520 LOCATE 23, 5: PRINT "ALGUN OTRO CALCULO S/N";
B$ = INPUT$(1): PRINT B$
IF B$ = "N" OR B$ = "n" THEN 530
IF B$ = "s" OR B$ = "S" THEN 5
BEEP: BEEP: GOTO 520
530 CLS : LOCATE 12, 30: PRINT " FIN DEL PROGRAMA"
FOR MGS = 1 TO 2000: NEXT MGS: CLS : END
540 CLS
GOSUB 10000
FOR I = 1 TO NT
LIN = CSRLIN
IF LIN = 21 THEN LOCATE LIN, 5: PRINT "    CUALQUIER TECLA PARA
CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 10000
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 5: PRINT I: LOCATE LIN, 14: PRINT N1(I): LOCATE LIN, 21: PRINT
N2(I)
LOCATE LIN, 35: PRINT L(I);
LOCATE LIN, 49: PRINT D(I): LOCATE LIN, 58: PRINT Q(I)
NEXT I
LOCATE LIN + 3, 1: PRINT "CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR": AA$ =
INPUT$(1)
GOSUB 10100
FOR I = 1 TO NN + CC
LIN = CSRLIN
IF LIN = 21 THEN LOCATE LIN, 5: PRINT "    CUALQUIER TECLA PARA
CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 10100
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 25: PRINT I: LOCATE LIN, 47: PRINT ABS(HB(I))

```

```

NEXT I
GOTO 520
470 FOR I = 1 TO NT
C2(I) = Q(I) / PC(I)
C1(I) = (C1(I) + C2(I)) / 2
NEXT I: GOTO 250
CLEAR , , 15000000
3000 LOCATE 10, 25: PRINT "P R O C E S A N D O"
FOR R = 1 TO NN
FOR Z = 1 TO NUMH(I)
B(R) = B(R) + HB(CARGA(Z, R)) * C1(TB(CARGA(Z, R)))
NEXT Z
B(R) = TI(R) - B(R)
NEXT R
FOR I = 1 TO NN
S = 0
FOR J = 1 TO NN
IF J = I THEN 5500
S = S + ABS(A(I, J) / A(I, I))
5500 NEXT J
RT(I) = S
NEXT I
L1 = RT(1)
FOR I = 2 TO NN
RF = L1 - RT(I)
IF RF > 0 THEN 5700
L1 = RT(I)
5700 NEXT I
IF L1 > 1 THEN W = .6: GOTO 5750
CLS
W = 1.3
5750 FOR I = 1 TO NN
S = 0
FOR J = 1 TO I - 1
IF J = I THEN 5800
S = S - A(I, J) * X1(J)
NEXT J
5800 S1 = 0
IF I = NN THEN 5850
FOR J = I + 1 TO NN
S1 = S1 - A(I, J) * HB(J)
NEXT J
5850 X1(I) = (1 - W) * HB(I) + W * (S + S1 + B(I)) / A(I, I)
NEXT I
RC = ABS(X1(1) - HB(1))
RC1 = ABS(X1(1))
FOR I = 2 TO NN
RH(I) = ABS(X1(I) - HB(I))
RH1(I) = ABS(X1(I))

```

```

NEXT I
FOR J = 2 TO NN
RG = RH(J) - RC
IF RG < 0 THEN 5870
RC = RH(J)
5870 NEXT J
FOR RK = 2 TO NN
RG1 = RH1(RK) - RC1
IF RG1 < 0 THEN 5880
RC1 = RH1(RK)
5880 NEXT RK
RD = RC / RC1
IF RD < TOL THEN GOTO 6500
FOR I = 1 TO NN
HB(I) = X1(I)
NEXT I
GOTO 5750
6500 FOR L = 1 TO NN
HB(L) = X1(L)
NEXT L
GOTO 510
2200 CLS
LOCATE 3, 30: PRINT " DATOS "
LOCATE 5, 10: PRINT "TRAMO NI N2 Longitud Diam,tro C"
RETURN
2300 LOCATE LIN + 5, 10: INPUT "CARGA CONOCIDA A CORREGIR (la
1,2,etc)", I
CLS : LOCATE 5, 10: PRINT "CARGA"; I
LOCATE 7, 10: INPUT "NO. DEL NUDO DONDE SE ENCUENTRA LA CARGA";
CC(I)
LOCATE 9, 10: INPUT "VALOR DE LA CARGA (m)"; HB(CC(I))
GOTO 35
4000 IF CC = 0 THEN GOTO 4010
CLS : LOCATE 3, 25: PRINT "CARGAS CONOCIDAS "
LOCATE 5, 20: PRINT "CARGA VALOR (m)"
4010 RETURN
6000 LOCATE LIN + 5, 15: INPUT "TRAMO POR CORREGIR ", I
CLS : LOCATE 7, 30: PRINT "TRAMO No."; I
LOCATE 10, 15: INPUT "LONGITUD (m) ="; L(I)
LOCATE 12, 15: INPUT "DIAMETRO (m) ="; D(I)
LOCATE 14, 15: INPUT "C DE HAZEN WILLIAMS ="; C(I)
LOCATE 16, 15: INPUT "NUDO INICIAL ="; N1(I)
LOCATE 18, 15: INPUT "NUDO FINAL ="; N2(I): CLS
GOTO 22
6200 CLS
LOCATE 3, 25: PRINT " NO. DE TRAMOS EN CADA NUDO "
LOCATE 5, 25: PRINT " NUDO TRAMOS"
RETURN
6300 LOCATE LIN + 5, 10: INPUT "NUDO A CORREGIR"; J

```

```

CLS
LOCATE 3, 25: PRINT " NO. DE TRAMOS EN CADA NUDO "
LOCATE 9, 10: PRINT "NUDO"; J;
LOCATE 9, 18: INPUT NT(J): CLS
GOTO 42
7000 CLS
LOCATE 3, 50: PRINT " NUDOS UNIDOS MEDIANTE UN TRAMO "
LOCATE 5, 20: PRINT "NUDO INICIAL  NUDO FINAL      TRAMO"
RETURN
7100 LOCATE LIN + 5, 10: INPUT "NUDO A CORREGIR"; K
CLS
LOCATE 7, 10: INPUT "QUE TRAMO SERA EL CORREGIDO (el 1§, el 2§, etc)
DE ESTE NUDO"; L
LOCATE 8, 10: PRINT "EL NUDO"; K; "ESTA UNIDO AL TRAMO"
LOCATE 8, 40: INPUT T(L, K)
LOCATE 9, 10: PRINT "UNIDO AL NUDO": LOCATE 9, 24: INPUT NU(K, T(L, K)):
CLS
GOTO 55
7200 CLS
LOCATE 3, 50: PRINT " GASTOS QUE INGRESAN (-) O EGRESAN (+) DEL
NUDO"
LOCATE 5, 20: PRINT "NUDO  GASTO (m3/s)"
RETURN
7300 LOCATE LIN + 5, 10: INPUT "NUDO A CORREGIR"; I
CLS
LOCATE 6, 10: PRINT "NUDO"; I
LOCATE 7, 10: INPUT "q ="; TI(I)
GOTO 65
7400 CLS
LOCATE 3, 10: PRINT " NO. DE CARGAS QUE LLEGAN AL NUDO"
LOCATE 5, 20: PRINT "NUDO  # CARGAS"
RETURN
7500 LOCATE LIN + 5, 10: INPUT "NUDO A CORREGIR"; I
CLS : LOCATE 3, 10: PRINT "NUDO"; I
LOCATE 5, 18: INPUT "CUANTAS CARGAS LE LLEGAN "; NUMH(I)
GOTO 75
7600 LOCATE 3, 20: PRINT " CARGAS QUE LLEGAN AL NUDO MEDIANTE
TRAMO"
LOCATE 5, 30: PRINT "NUDO  CARGA  TRAMO"
RETURN
7700 LOCATE LIN + 5, 10: INPUT " NUDO A CORREGIR"; Z
CLS : LOCATE 5, 30: PRINT "NUDO"; Z
LOCATE 5, 45: INPUT CARGA(R, Z)
LOCATE 7, 10: INPUT "UNIDA POR EL TRAMO NO. "; TB(CARGA(R, Z)): CLS
GOTO 85
8000 CLS : LOCATE 3, 31: PRINT "R E S U L T A D O S"
LOCATE 5, 5: PRINT "TRAMO  NI  NF  LONGITUD  DIAMETRO
GASTO"
LOCATE 6, 5: PRINT "                (m)  (m)  m3/s"

```

```

RETURN
9000 CLS
LOCATE 3, 30: PRINT "CARGAS EN LOS NUDOS"
LOCATE 7, 33: PRINT "NUDO      CARGA"
LOCATE 8, 33: PRINT "      (m)"
RETURN
10000 CLS
PRINT "      METODO DEL ELEMENTO FINITO APLICADO A REDES DE
TUBERIAS"
PRINT "      RESULTADOS"
PRINT
PRINT " TRAMO  N1  N2    LONGITUD  DIAMETRO  GASTO"
PRINT "      (m)    (m)    (m3/s)"
RETURN
10100 CLS
PRINT "      CARGAS EN LOS NUDOS"
PRINT "      NUDO      CARGA"
PRINT "      (m)"
RETURN

```

PROGRAMA BASADO EN EL METODO POR CORRECCION DE CARGAS

```
5 CLS
' analisis de redes por correccion de cargas
DIM N1(50), L(50), D(50), Q(50), H(50), P(50), N2(50)
G = 9.8
LOCATE 2, 10: PRINT "ANALISIS DE REDES POR CORRECCION DE CARGAS"
LOCATE 3, 13: PRINT "(Las cargas fijas se enumeran primero)"
LOCATE 6, 10: INPUT "NUMERO DE TRAMOS"; NT
LOCATE 7, 10: INPUT "NUMERO DE NUDOS"; NN
LOCATE 8, 10: INPUT "NUMERO DE CARGAS FIJAS"; CF
LOCATE 18, 15: PRINT "ESTAN CORRECTOS LOS DATOS S/N";
6 D$ = INPUT$(1): PRINT D$
IF D$ = "N" OR D$ = "n" THEN 5
IF D$ = "s" OR D$ = "S" THEN 8
BEEP: BEEP: GOTO 6
8 H3 = .001
f = .02
CLS
FOR I = 1 TO CF
LOCATE 3, 10: PRINT "CARGAS FIJAS (Se enumeran primeramente)"
LOCATE 5, 10: PRINT " CARGA"; I
LOCATE 7, 10: INPUT "VALOR="; H(I): CLS
NEXT I
IF CF = 0 THEN 18
10 GOSUB 4000
FOR I = 1 TO CF
LIN = CSRLIN: IF LIN = 20 THEN LOCATE LIN, 10: PRINT "CUALQUIER TECLA
PARA CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 4000
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 15: PRINT I: LOCATE LIN, 36: PRINT H(I)
NEXT I
15 LOCATE LIN + 3, 15: PRINT "ESTAN CORRECTOS LOS DATOS S/N";
D$ = INPUT$(1): PRINT D$
IF D$ = "N" OR D$ = "n" THEN 5000
IF D$ = "s" OR D$ = "S" THEN 18
BEEP: BEEP: GOTO 15
18 CLS
LOCATE 3, 10: PRINT "CARACTERISTICAS DE LA TUBERIA"
FOR J = 1 TO NT
LOCATE 7, 10: PRINT "TRAMO"; J
LOCATE 10, 10: INPUT "NUDO INICIAL"; N1(J)
LOCATE 11, 10: INPUT "NUDO FINAL"; N2(J)
LOCATE 12, 10: INPUT "LONGITUD (m)"; L(J)
LOCATE 13, 10: INPUT "DIAMETRO (m)"; D(J)
LOCATE 14, 10: INPUT "GASTO DEL NUDO FINAL"; P(N2(J))
```



```

LOCATE 15, 10: INPUT "CARGA SUPUESTA EN EL NUDO FINAL"; H(N2(J)):
CLS
NEXT J
22 GOSUB 2200
FOR J = 1 TO NT
LIN = CSRLIN: IF LIN = 20 THEN LOCATE LIN, 10: PRINT "CUALQUIER TECLA
PARA CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 2200
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 8: PRINT J: LOCATE LIN, 15: PRINT N1(J)
LOCATE LIN, 22: PRINT N2(J): LOCATE LIN, 31: PRINT L(J)
LOCATE LIN, 43: PRINT D(J): LOCATE LIN, 54: PRINT P(N2(J))
LOCATE LIN, 63: PRINT H(N2(J))
NEXT J
25 LOCATE LIN + 3, 15: PRINT "ESTAN CORRECTOS LOS DATOS S/N":
D$ = INPUT$(1): PRINT D$
IF D$ = "N" OR D$ = "n" THEN 6000
IF D$ = "S" OR D$ = "s" THEN 30
BEEP: BEEP: GOTO 25
CLS
LOCATE 10, 25: PRINT " P R O C E S A N D O"
30 FOR I1 = 1 TO 400
150 V = 0
FOR J = 1 TO NT
IF H(N1(J)) <> H(N2(J)) THEN 180
H(N1(J)) = H(N2(J)) + .01
180 IF H(N1(J)) > H(N2(J)) THEN 220
U = N2(J)
N2(J) = N1(J)
N1(J) = U
220 H1 = H(N1(J)) - H(N2(J))
Q(J) = SQR(H1 * D(J) ^ 5 * .785 ^ 2 * 2 * G / f / L(J))
NEXT J
FOR I = CF + 1 TO NN
R = -P(I)
S = 0
FOR J = 1 TO NT
IF N1(J) <> I THEN 330
R = R - Q(J)
S = S + Q(J) / ABS(H(N1(J)) - H(N2(J)))
GOTO 360
330 IF N2(J) <> I THEN 360
R = R + Q(J)
S = S + Q(J) / ABS(H(N1(J)) - H(N2(J)))
360 NEXT J
H(I) = H(I) + 2 * R / S
IF ABS(2 * R / S) <= V THEN 400
V = ABS(2 * R / S)

```

```

400 NEXT I
IF V < H3 THEN 430
NEXT I1
430 CLS
GOSUB 8000
FOR I = 1 TO NT
LIN = CSRLIN
IF LIN = 21 THEN LOCATE LIN, 5: PRINT "CUALQUIER TECLA PARA
CONTINUAR ": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 8000
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 6: PRINT I: LOCATE LIN, 13: PRINT N1(I): LOCATE LIN, 20: PRINT
N2(I)
LOCATE LIN, 30: PRINT L(I)
LOCATE LIN, 42: PRINT D(I): LOCATE LIN, 52: PRINT Q(I): LOCATE LIN, 60:
PRINT H(N2(I))
NEXT I
520 LOCATE 23, 5: PRINT "ALGUN OTRO CALCULO S/N";
B$ = INPUT$(1): PRINT B$
IF B$ = "N" OR B$ = "n" THEN 530
IF B$ = "s" OR B$ = "S" THEN 5
BEEP: BEEP: GOTO 520
530 CLS : LOCATE 12, 30: PRINT "FIN DEL PROGRAMA"
FOR MGS = 1 TO 2000: NEXT MGS: CLS : END
2200 CLS
LOCATE 3, 30: PRINT "  DATOS"
LOCATE 5, 5: PRINT "TRAMO  NUDO  NUDO  LONGITUD  DIAMETRO
GASTO Y CARGA"
LOCATE 6, 5: PRINT "  INICIAL  FINAL  DEL NUDO FINAL"
LOCATE 7, 5: PRINT
RETURN
6000 LOCATE LIN + 5, 15: INPUT "TRAMO A CORREGIR"; J
CLS
LOCATE 7, 10: PRINT "TRAMO"; J
LOCATE 10, 10: INPUT "NUDO INICIAL"; N1(J)
LOCATE 11, 10: INPUT "NUDO FINAL"; N2(J)
LOCATE 12, 10: INPUT "LONGITUD (m)"; L(J)
LOCATE 13, 10: INPUT "DIAMETRO (m)"; D(J)
LOCATE 14, 10: INPUT "GASTO DEL NUDO FINAL"; P(N2(J))
LOCATE 15, 10: INPUT "CARGA SUPUESTA EN EL NUDO FINAL"; H(N2(J)):
CLS
GOTO 22
8000 CLS : LOCATE 3, 31: PRINT "R E S U L T A D O S"
LOCATE 5, 5: PRINT "TRAMO  NI  NF  LONGITUD  DIAMETRO  GASTO
CARGA"
LOCATE 6, 5: PRINT "  TRAMO  NF  "
LOCATE 7, 5: PRINT "  (m)  (m)  m3/s  (m)"
LOCATE 8, 5: PRINT

```

```
RETURN
4000 CLS
LOCATE 3, 25: PRINT "CARGAS FIJAS"
LOCATE 5, 10: PRINT "  CARGA          VALOR"
RETURN
5000 LOCATE LIN + 5, 10: INPUT "CARGA FIJA A CORREGIR"; I
CLS
LOCATE 5, 10: PRINT " CARGA"; I
LOCATE 7, 10: INPUT "VALOR="; H(I)
GOTO 10
```

PROGRAMA BASADO EN EL METODO DE HARDY CROSS

```
R1 = 1
5 CLS
DIM NT(50), N(50, 50), L(50), D(50), K1(50), K2(50), K(50), QT(50, 50)
DIM DQ(50), A1(50), A2(50), NODO(50), GASTO(50), A(100)
10 CLS
LOCATE 2, 20: PRINT " METODO DE CROSS PARA REDES CERRADAS"
LOCATE 6, 10: INPUT "NUMERO DE CIRCUITOS"; NC
LOCATE 8, 10: INPUT "NUMERO DE TRAMOS"; NT
LOCATE 10, 10: INPUT "NUMERO DE NUDOS"; NN
15 LOCATE 16, 20: PRINT "SON CORRECTOS LOS DATOS S/N"
E$ = INPUT$(1): LOCATE 16, 50: PRINT E$
IF E$ = "N" OR E$ = "n" THEN 10
IF E$ = "S" OR E$ = "s" THEN 100
BEEP: BEEP: GOTO 15
100 CLS
110 LOCATE 6, 10: PRINT "No. DE TRAMOS EN CADA CIRCUITO"
FOR I = 1 TO NC
LOCATE 8, 10: PRINT "CIRCUITO "; I
LOCATE 10, 10: INPUT "TRAMOS "; NT(I): CLS
NEXT I
115 GOSUB 4000
FOR I = 1 TO NC
LIN = CSRLIN: IF LIN = 20 THEN LOCATE LIN, 10: PRINT "CUALQUIER TECLA
PARA CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 4000
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 23: PRINT I: LOCATE LIN, 38: PRINT NT(I)
NEXT I
120 LOCATE LIN + 3, 15: PRINT "ESTAN CORRECTOS LOS DATOS S/N ";
E$ = INPUT$(1): PRINT E$
IF E$ = "N" OR E$ = "n" THEN 4100
IF E$ = "S" OR E$ = "s" THEN 300
BEEP: BEEP: GOTO 120
300 CLS
F = .02
FOR I = 1 TO NT
LOCATE 3, 10: PRINT "CARACTERISTICAS DE LA TUBERIA"
LOCATE 7, 10: PRINT "TRAMO"; I
LOCATE 10, 10: INPUT "LONGITUD (m)"; L(I)
LOCATE 12, 10: INPUT "DIAMETRO (m)"; D(I): CLS
NEXT I
315 GOSUB 4200
FOR I = 1 TO NT
LIN = CSRLIN: IF LIN = 20 THEN LOCATE LIN, 10: PRINT "CUALQUIER TECLA
PARA CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 4200
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 26: PRINT I: LOCATE LIN, 39: PRINT L(I): LOCATE LIN, 56: PRINT
D(I)
NEXT I
```

```

320 LOCATE LIN + 3, 15: PRINT "ESTAN CORRECTOS LOS DATOS S/N ";
E$ = INPUT$(1): PRINT E$
IF E$ = "N" OR E$ = "n" THEN 4300
IF E$ = "S" OR E$ = "s" THEN 350
BEEP: BEEP: GOTO 320
350 CLS
FOR G = 1 TO NT
A(G) = .0826 * F * L(G) / D(G) ^ 5
NEXT G
FOR R = 1 TO NC
LOCATE 3, 20: PRINT "RECUERDA QUE EL GASTO ES POSITIVO SI TIENE"
LOCATE 4, 20: PRINT "LA ORIENTACION DE LAS MANECILLAS DEL RELOJ"
FOR J = 1 TO NT(R)
LOCATE 7, 30: PRINT "CIRCUITO"; R
LOCATE 9, 10: PRINT "DE EL NUMERO DEL TRAMO"; J;
LOCATE 9, 38: INPUT N(J, R)
LOCATE 11, 10: INPUT "GASTO"; QT(J, R): CLS
NEXT J
NEXT R
415 GOSUB 4400
FOR R = 1 TO NC
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 25: PRINT "CIRCUITO"; R
FOR J = 1 TO NT(R)
LIN = CSRLIN: IF LIN = 20 THEN LOCATE LIN, 10: PRINT "CUALQUIER TECLA
PARA CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 4400
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 21: PRINT N(J, R): LOCATE LIN, 33: PRINT QT(J, R)
NEXT J
NEXT R
420 LOCATE LIN + 3, 15: PRINT "ESTAN CORRECTOS LOS DATOS S/N ";
E$ = INPUT$(1): PRINT E$
IF E$ = "N" OR E$ = "n" THEN 4500
IF E$ = "S" OR E$ = "s" THEN 2000
BEEP: BEEP: GOTO 420
2000 R1 = R1 + 1
FOR I = 1 TO NC
FOR J = 1 TO NT(I)
A1(N(J, I)) = A(N(J, I)) * ABS(QT(J, I))
A2(N(J, I)) = A1(N(J, I)) * QT(J, I)
A1 = A1 + A1(N(J, I))
A2 = A2 + A2(N(J, I))
NEXT J
DQ(I) = -.5 * A2 / A1
FOR J = 1 TO NT(I)
QT(J, I) = QT(J, I) + DQ(I)
NEXT J
NEXT I
FOR I = 1 TO NC
FOR L = 1 TO NT(I)

```

```

FOR K = 1 TO NC
FOR J = 1 TO NT(K)
IF I = K THEN 800
IF N(L, I) <> N(J, K) THEN 700
QT(J, K) = QT(J, K) - DQ(I)
700 NEXT J
800 NEXT K
NEXT L
NEXT I
FOR I = 1 TO NC
IF ABS(DQ(I)) > .001 THEN GOTO 2000
NEXT I
510 GOSUB 8000
FOR R = 1 TO NC
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 25: PRINT "CIRCUITO"; R
FOR J = 1 TO NT(R)
LIN = CSRLIN
IF LIN = 21 THEN LOCATE LIN, 5: PRINT "CUALQUIER TECLA PARA
CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 8000
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 11: PRINT N(J, R): LOCATE LIN, 20: PRINT D(N(J, R))
LOCATE LIN, 35: PRINT L(N(J, R))
LOCATE LIN, 48: PRINT QT(J, R)
NEXT J
NEXT R
515 LOCATE LIN + 3, 15: PRINT "DESEA IMPRESION DE RESULTADOS S/N";
C$ = INPUT$(1): PRINT C$
IF C$ = "N" OR C$ = "n" THEN 520
IF C$ = "s" OR C$ = "S" THEN 540
BEEP: BEEP: GOTO 515
520 LOCATE LIN + 5, 15: PRINT "ALGUN OTRO CALCULO S/N";
B$ = INPUT$(1): PRINT B$
IF B$ = "N" OR B$ = "n" THEN 530
IF B$ = "s" OR B$ = "S" THEN 5
BEEP: BEEP: GOTO 520
530 CLS : LOCATE 12, 30: PRINT "FIN DEL PROGRAMA"
FOR MGS = 1 TO 2000: NEXT MGS: CLS : END
540 CLS
GOSUB 10000
FOR R = 1 TO NC
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 25: PRINT "CIRCUITO"; R
FOR J = 1 TO NT(R)
LIN = CSRLIN
IF LIN = 20 THEN LOCATE LIN, 5: PRINT "CUALQUIER TECLA PARA
CONTINUAR": AA$ = INPUT$(1): GOSUB 10000
LIN = CSRLIN
LOCATE LIN, 11: PRINT N(J, R): LOCATE LIN, 20: PRINT D(N(J, R))
LOCATE LIN, 30: PRINT L(N(J, R))

```

```

LOCATE LIN, 42: PRINT QT(J, R)
NEXT J
NEXT R
LOCATE LIN + 3, 15: PRINT "CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR": AA$ =
INPUT$(1)
GOTO 520
4000 CLS
LOCATE 2, 20: PRINT "No. DE TRAMOS EN CADA CIRCUITO"
LOCATE 3, 20: PRINT "CIRCUITO      TRAMOS"
RETURN
4100 LOCATE LIN + 5, 15: INPUT "CIRCUITO A CORREGIR"; I
CLS : LOCATE 5, 10: PRINT "CIRCUITO"; I
LOCATE 6, 10: INPUT "TRAMOS "; NT(I)
GOTO 115
4200 CLS
LOCATE 3, 30: PRINT "CARACTERISTICAS DE LA TUBERIA"
LOCATE 5, 25: PRINT "TRAMO      LONGITUD      DIAMETRO"
RETURN
4300 LOCATE LIN + 5, 15: INPUT "TRAMO A CORREGIR"; I
CLS
LOCATE 7, 10: PRINT "TRAMO"; I
LOCATE 10, 10: INPUT "LONGITUD (m)"; L(I)
LOCATE 12, 10: INPUT "DIAMETRO (m)"; D(I)
GOTO 315
4400 CLS
LOCATE 6, 20: PRINT "TRAMO      GASTO"
RETURN
4500 LOCATE LIN + 5, 15: INPUT "CIRCUITO A CORREGIR"; R
IF R < 1 OR R > NC THEN BEEP: BEEP: GOTO 4500
CLS : LOCATE 6, 10: PRINT "CIRCUITO"; R
LOCATE 8, 10: INPUT "QUE TRAMO DEL CIRCUITO (el 1º,2º,...) "; J
LOCATE 9, 10: INPUT "QUE NUMERO ES"; N(J, R)
LOCATE 10, 10: INPUT "GASTO"; QT(J, R)
GOTO 415
8000 CLS : LOCATE 3, 31: PRINT "R E S U L T A D O S"
LOCATE 5, 10: PRINT "TRAMO      DIAMETRO      LONGITUD      GASTO"
LOCATE 6, 10: PRINT "      (m)      (m)      m3/s"
RETURN
10000 CLS
PRINT "      METODO DE CROSS APLICADO A REDES DE TUBERIAS"
PRINT "      RESULTADOS"
PRINT
PRINT "      TRAMO      DIAMETRO      LONGITUD      GASTO"
PRINT "      (m)      (m)      (m3/s)"
RETURN

```

**METODO DE CROSS MODIFICADO PARA EL DISEÑO ECONOMICO EN
REDES DE DISTRIBUCION DE AGUA POTABLE**

```
20 REM PROGRAMA PARA EL DISEÑO ECONOMICO EN REDES DE
DISTRIBUCION DE
30 REM AGUA POTABLE CON EL METODO DE CROSS MODIFICADO POR E.
VAZQUEZ
40 CLEAR
50 CLS
60 PRINT "número de circuitos interiores=";
70 INPUT NN
80 PRINT "número de tramos circuito exterior=";
90 INPUT M
100 DIM K(NN, M), D(NN, M), L(NN, M), DC(NN, M), HF(NN, M), Q(NN, M)
110 DIM SQ(NN), SL(NN), SH(NN), KQ(NN), DH(NN), FI(20)
120 FOR K = 0 TO 20
130 READ FI(K)
140 NEXT K
150 DATA 0.10, 0.15, 0.20, 0.30, 0.45, 0.61, 0.61, 0.76, 0.91, 0.91
160 DATA 1.07, 1.22, 1.22, 1.52, 1.52, 1.52, 1.52, 1.52, 1.83, 1.83
DATA 1.83
180 FOR J = 1 TO M
190 IF J > NN THEN 270
200 PRINT "longitud del tramo L("; 0; ";"; J; ") =";
210 INPUT L(O, J)
220 L(J, 0) = L(O, J)
230 PRINT "gasto inicial del tramo (en m^3/s) Q("; 0; ";"; J; ") =";
240 INPUT Q(O, J)
250 Q(J, 0) = Q(O, J)
260 GOTO 350
270 PRINT "longitud del tramo L("; O; ";"; J; ") =";
280 INPUT L(O, J)
290 PRINT "gasto inicial del tramo (en m^3/s) Q("; O; ";"; J; ") =";
300 INPUT Q(O, J)
310 PRINT "circuito interior adyacente al tramo ("; O; ";"; J; ") =";
320 INPUT I
330 L(I, J) = L(O, J)
340 Q(I, J) = Q(O, J)
350 NEXT J
360 FOR I = 1 TO NN - 1
370 FOR J = I + 1 TO NN
380 PRINT "longitud del tramo L("; I; ";"; J; ") =";
390 INPUT L(I, J)
400 L(J, I) = L(I, J)
410 PRINT "gasto inicial el tramo en m^3/s) Q("; I; ";"; J; ") =";
420 INPUT Q(I, J)
430 Q(J, I) = -Q(I, J)
```



```

440 NEXT J
450 NEXT I
460 PRINT "coeficiente de Darcy, f=";
470 INPUT F
480 PRINT "diferencia de cargas en el circuito exterior=";
490 INPUT DH(O)
500 PRINT "terminan datos, inicia calculo de corrección"
510 REM CALCULA CORRECCION DE LOS GASTOS INICIALES
520 C = 0
530 C = C + 1
540 FOR I = 0 TO NN
550 SN = 0
560 SD = 0
570 FOR J = 0 TO M
580 IF L(I, J) = 0 THEN 610
590 SN = SN + L(I, J) * Q(I, J)
600 SD = SD + L(I, J)
610 NEXT J
620 DQ = -.5 * (SN / SD)
630 FOR K = 0 TO M
640 IF L(I, K) = 0 THEN 660
650 Q(I, K) = Q(I, K) + DQ
660 NEXT K
670 IF I > 0 THEN 750
680 FOR J=1 TO N
690 Q(J,0)=Q(0,J)
700 NEXT J
710 FOR K = 1 TO NN
720 FOR J = NN + 1 TO M
730 IF L(K, J) = 0 THEN 750
740 Q(K, J) = Q(O, J)
750 NEXT J
760 NEXT K
770 GOTO 870
780 FOR J = 1 TO NN
790 IF L(I, J) = 0 THEN 810
800 Q(J, I) = -Q(I, J)
810 NEXT J
820 Q(O, I) = Q(I, O)
830 FOR J = NN + 1 TO M
840 IF L(I, J) = 0 THEN 860
850 Q(O, J) = Q(I, J)
860 NEXT J
870 NEXT I
880 IF C = 3 * M THEN 910
890 GOTO 530
900 REM IMPRIME LOS GASTOS PARA DISEÑO

```

```

910 FOR J = 0 TO M
920 IF J = NN THEN 950
930 IF L(NN, J) = 0 THEN 950
940 PRINT "gasto para diseño Q("; NN; ", "; J; ") ="; Q(NN, J); "m^3/s"
950 NEXT J
960 FOR K = 1 TO NN - 1
970 I = NN - K
980 FOR J = 0 TO M
990 IF I = J THEN 1020
1000 IF L(I, J) = 0 THEN 1020
1010 PRINT "gasto para diseño Q("; I; ", "; J; ") ="; Q(I, J); "m^3/s"
1020 NEXT J
1030 NEXT K
1040 STOP
1050 REM DISEÑO DE TUBERIAS
1060 SQ(O) = 0
1070 FOR I = 0 TO M
1080 IF L(O, I) = 0 THEN 1110
1090 IF Q(O, I) < 0 THEN 1110
1100 SQ(O) = SQ(O) + L(O, I) * Q(O, I)
1110 NEXT I
1120 CTE = DH(O) / SQ(O)
1130 FOR J = 0 TO NN
1140 REM CALCULA LOS DIAMETROS TEORICOS
1150 FOR I = 0 TO M
1160 IF L(J, I) = 0 THEN 1190
1170 D5 = (F * ABS(Q(J, I))) / 12.1 / CTE
1180 D(J, I) = D5 ^ (1 / 5)
1190 NEXT I
1200 NEXT J
1210 REM CALCULA LOS DIAMETROS COMERCIALES
1220 FOR J = 0 TO NN
1230 FOR I = 0 TO M
1240 IF L(J, I) = 0 THEN 1280
1250 DA = D(J, I) * 10
1260 K = INT(DA)
1270 DC(J, I) = FI(K)
1280 NEXT I
1290 NEXT J
1300 REM IMPRIME LOS DIAMETROS COMERCIALES
1310 FOR J = 1 TO NN
1320 FOR I = 0 TO M
1330 IF L(J, I) = 0 THEN 1350
1340 PRINT "diámetro comercial en el tramo dc("; J; ", "; I; ") ="; DC(J, I); "m"
1350 NEXT I
1360 NEXT J
1370 STOP

```

```

1380 REM REvisa LOS GASTOS CON DIAMETROS COMERCIALES
1390 REM CALCULA CONSTANTES ESTATICAS
1400 FOR J = 0 TO NN
1410 FOR I = 0 TO M
1420 IF L(J, I) = 0 THEN 1440
K(J, I) = F / (12.1 * (DC(J, I) ^ 5))
1440 NEXT I
NEXT J
REM CALCULA CORRECCION CON DIAMETROS COMERCIALES
C = 0
1480 C = C + 1
FOR I = 0 TO NN
SN = 0
SD = 0
FOR J = 0 TO M
IF L(I, J) = 0 THEN 1580
S1 = L(I, J) * ABS(Q(I, J))
S2 = S1 * L(I, J)
SN = SN + S2
SD = SD + S1
1580 NEXT J
DQ = -.5 * (SN / SD)
FOR K = 0 TO M
IF L(I, K) = 0 THEN 1630
Q(I, K) = Q(I, K) + DQ
1630 NEXT K
IF I > 0 THEN 1750
FOR J = 1 TO NN
Q(J, Q) = Q(Q, J)
NEXT J
FOR K = 1 TO NN
FOR J = NN + 1 TO M
IF L(K, J) = 0 THEN 1720
Q(K, J) = Q(O, J)
1720 NEXT J
NEXT K
GOTO 1840
1750 FOR J = 1 TO NN
IF L(I, J) = 0 THEN 1780
Q(J, I) = -Q(I, J)
1780 NEXT J
1790 Q(O, I) = Q(I, O)
FOR J = NN + 1 TO M
IF L(I, J) = 0 THEN 1830
Q(O, J) = Q(I, J)
1830 NEXT J
1840 NEXT I

```

```

IF C = 3 * M THEN 1880
GOTO 1480
REM IMPRIME GASTOS CON DIAMETRO COMERCIAL
1880 FOR J = 0 TO NN
IF J = NN THEN 1920
PRINT "GASTO CON DIAMETRO COMERCIAL Q("; NN; ","; J; ")="; Q(NN, J);
"m3/s"
1920 NEXT J
FOR K = 1 TO NN - 1
I = NN - K
FOR J = 0 TO M
IF I = J THEN 1990
PRINT "GASTO CON DIAMETRO COMERCIAL Q("; I; ","; J; ")="; Q(I, J); "m3/s"
1990 NEXT J
NEXT K
STOP
REM CALCULA E IMPRIME LAS PERDIDAS DE CARGA EN LOS TRAMOS
FOR J = 1 TO NN
FOR I = 0 TO M
IF L(J, I) = 0 THEN 2080
HF(J, I) = K(J, I) * (Q(J, I) ^ 2)
PRINT "PERDIDA DE CARGA EN EL TRAMO hf("; J; ","; I; ")="; HF(J, I); "m"
2080 NEXT I
NEXT J
REM CALCULA EL VOLUMEN ALMACENADO EN LA RED
VOL = 0
FOR J = 1 TO NN
FOR I = 0 TO M
IF L(J, I) = 0 THEN 2160
VOL = VOL + ((3.1416 / 4) * (DC(J, I) ^ 2)) * L(J, I)
2160 NEXT I
NEXT J
PRINT "VOLUMEN ALMACENADO EN LA RED="; VOL

```

PROGRAMA PARA CALCULAR UNA RED DINAMICA DE TUBERIAS

```
10 REM REDINAM
20 REM RED DINAMICA DE TUBERIAS
30 CLEAR
40 CLS
  READ N, M, F, TT, Z
  DATA 4, 0, .02, 60, 100
  L = N + M
60 PRINT "num. de nudos incognita="; N
80 PRINT "num. condiciones de frontera ademas del cero="; M
  PRINT "coeficiente de rugosidad de Darcy-W.="; F
110 PRINT "delta T, intervalo de tiempo en segundos="; TT
130 PRINT "numero de intervalos de tiempo="; Z
140 DT = 9.810001 * TT
150 TS = (Z * TT) / 3600
160 PRINT "tiempo de simulacion en horas="; TS
170 DIM K(L, L), E(L, L), L(L, L), DEM(N, Z)
180 DIM H(L), Z(L), Q(L, Z), HF(M, Z), MN(L, L)
190 STOP
200 FOR T = 0 TO Z
210 HF(0, T) = 100
220 NEXT T
230 FOR T = 0 TO Z
240 PRINT "carga piezometrica h(0,"; T; ")="; HF(0, T)
250 NEXT T
260 STOP
270 FOR J = 0 TO L
280 READ H(J)
290 NEXT J
300 DATA 100, 96.14, 91.60, 87.84, 88.07

310 DATA          70.00, 45.00
  DATA 38.79, 40.98
320 FOR J = 0 TO L
330 PRINT "carga piezometrica inicial en el nudo H("; J; ")="; H(J)
340 NEXT J
  STOP
350 FOR T = 0 TO Z
360 READ DEM(0, T)
370 NEXT T
380 DATA 0.5, 0.50, 0.50, 0.50, 0.50, 0.50
390 DATA 0.52, 0.54, 0.56, 0.58, 0.60
400 DATA 0.64, 0.68, 0.72, 0.76, 0.80
410 DATA 0.84, 0.88, 0.92, 0.96, 1.00
420 DATA 0.976, 0.952, 0.928, 0.904, 0.88
430 DATA 0.864, 0.848, 0.832, 0.816, 0.80
```

```

440 DATA      0.79, 0.78, 0.77, 0.76, 0.75
450 DATA      0.72, 0.69, 0.66, 0.63, 0.60
460 DATA      0.58, 0.56, 0.54, 0.52, 0.50
470 DATA      0.50, 0.50, 0.50, 0.50, 0.50
480 FOR J = 1 TO N
490 FOR T = 0 TO Z
500 Q(J, T) = (J / 10) * DEM(0, T)
    Q(1, T) = .5
    Q(2, T) = -.2
    Q(3, T) = .6
    Q(4, T) = 1.4

    Q(6, T) = .05
    Q(7, T) = .08
    Q(8, T) = .08
    Q(9, T) = .1
510 NEXT T
520 NEXT J
530 FOR J = 1 TO N
540 FOR T = 0 TO Z
550 PRINT "gasto en el nudo q("; J; ","; T; ")="; Q(J, T)
560 NEXT T
570 NEXT J
    STOP
580 FOR J = 0 TO L - 1
590 FOR I = J + 1 TO L
600 READ MN(J, I)
610 NEXT I
620 NEXT J
630 DATA 1, 0, 0, 0
    DATA 2, 3, 0
    DATA 3, 4
    DATA 4
    DATA 5, 0, 0, 0, 0, 0, 0
    DATA 0, 0, 0, 9, 0, 0
    DATA 7, 8, 0, 0, 0
    DATA 0, 9, 0, 0
    DATA 9, 0, 0
    DATA 0, 11
    DATA 0
650 FOR J = 0 TO L - 1
660 FOR I = J + 1 TO L
670 IF MN(J, I) = 0 THEN 690
680 PRINT "nudo opuesto al ("; J; ")="; MN(J, I)
690 NEXT I
700 NEXT J

```

```

STOP
790 FOR J = 0 TO L - 1
800 FOR I = J + 1 TO L
    IF MN(J, I) = 0 THEN 830
810 READ L(J, I)
820 L(I, J) = L(J, I)
830 NEXT I
840 NEXT J
850 DATA 200
860 DATA 400, 300
870 DATA 500, 300
880 DATA 400

890 DATA 2850
900 DATA 1900
910 DATA 1950, 1300
    DATA 1000
    DATA 1600
    DATA 1500
920 FOR J = 0 TO L - 1
930 FOR I = J + 1 TO L
940 IF L(J, I) = 0 THEN 960
950 PRINT "longitud del tramo L("; J; ", "; I; ")="; L(J, I)
960 NEXT I
970 NEXT J
980 STOP
990 FOR J = 0 TO L - 1
1000 FOR I = J + 1 TO L
    IF MN(J, I) = 0 THEN 1030
1010 READ E(J, I)
1020 E(I, J) = E(J, I)
1030 NEXT I
1040 NEXT J
1050 DATA 0.60
1060 DATA 0.60, 0.40
1070 DATA 0.40, .60
1080 DATA 0.60

1090 DATA 1.22
1100 DATA 1.22
1110 DATA 0.91, 0.51
    DATA 1.22
    DATA 0.51
    DATA 1.22
1120 FOR J = 0 TO L - 1
1130 FOR I = J + 1 TO L
1140 IF E(J, I) = 0 THEN 1160

```

```

1150 PRINT "diametro del tramo D("; J; ", "; I; ")="; E(J, I)
1160 NEXT I
1170 NEXT J
1180 STOP
1190 FOR J = 0 TO L - 1
1200 FOR I = J + 1 TO L
1210 IF L(J, I) = 0 THEN 1240
1220 K(J, I) = (F * L(J, I)) / (12.1 * (E(J, I) ^ 5))
1230 K(I, J) = K(J, I)
1240 NEXT I
1250 NEXT J
1260 FOR J = 0 TO L - 1
1270 FOR I = J + 1 TO L
1280 IF K(J, I) = 0 THEN 1300
1290 PRINT "constante elastica K("; J; ", "; I; ")="; K(J, I)
1300 NEXT I
1310 NEXT J
1320 STOP
1330 FOR J = 0 TO L - 1
1340 FOR I = J + 1 TO L
1350 E(J, I) = (3.141593 / 4) * (E(J, I) ^ 2)
1360 K(J, I) = K(J, I) * E(J, I)
1370 L(I, J) = L(J, I)
1380 E(I, J) = E(J, I)
1390 K(I, J) = K(J, I)
1400 NEXT I
1410 NEXT J
1450 REM GASTOS INICIALES
1460 DIM G(L, L), R(L, L)
1470 FOR J = 0 TO L - 1
1480 FOR I = J + 1 TO L
1490 IF K(J, I) = 0 THEN 1570
1500 KE = K(J, I) / E(J, I)
1510 SG = (H(J) - H(I)) / ABS(H(J) - H(I))
1520 QE = SQR(ABS(H(J) - H(I)) / KE)
1530 G(J, I) = SG * QE
1540 G(I, J) = -G(J, I)
1550 REM R(J, I) = L(J, I) / DT + K(J, I) * ABS(G(J, I))

R(J, I) = K(J, I) * ABS(G(J, I))
1560 R(I, J) = R(J, I)
1570 NEXT I
1580 NEXT J
1590 REM GASTOS RED DINAMICA
1600 FOR T = 0 TO Z
1610 H(0) = HF(0, T)
1620 FOR J = N + 1 TO L

```



```

1630 H(J) = HF(J, T)
1640 NEXT J
1650 FOR J = 0 TO L - 1
1660 FOR I = J + 1 TO L
1670 IF K(J, I) = 0 THEN 1730
1680     RT = DT * R(J, I)
1690 G(J, I) = (E(J, I) / R(J, I)) * (H(J) - H(I))

        G(J, I) = G(J, I) + (L(J, I) / RT) * G(J, I)
1700 G(I, J) = -G(J, I)
1710 R(J, I) = L(J, I) / DT + K(J, I) * ABS(G(J, I))
        R(J, I) = K(J, I) * ABS(G(J, I))
1720 R(I, J) = R(J, I)
1730 NEXT I
1740 NEXT J
1750 REM ELEMENTOS DE LA MATRIZ
1760 DIM A(L, L), B(L)
1770 FOR K = 1 TO N
1780 FOR J = 0 TO L
1790 IF K(K, J) = 0 THEN 1820
1800 A(K, J) = -E(K, J) / R(K, J)
1810 A(J, K) = A(K, J)
1820 NEXT J
1830 NEXT K
1840 FOR K = 1 TO N
1850 FOR J = 0 TO L
1860 IF K(K, J) = 0 THEN 1880
1870 A(K, K) = A(K, K) + ABS(A(K, J))
1880 NEXT J
1890 A(K, K) = A(K, K)
1900 NEXT K
1910 FOR K = 1 TO N
1920 B(K) = -HF(0, T) * A(K, 0) - Q(K, T)
1930 NEXT K
1940 FOR K = 1 TO N
1950 FOR I = N + 1 TO L
1960 IF M = 0 THEN 2000
1970 B(K) = B(K) + H(I) * ABS(A(K, I))
1980 NEXT I
1990 NEXT K
2000     FOR K = 1 TO N
2010     FOR J = 0 TO L
2020     IF K(K, J) = 0 THEN 2070
2030     BR = L(K, J) / R(K, J)
2040     BQ = BR * (-G(K, J))
2050     B(K) = B(K) + BQ / DT
2070     NEXT J

```

```
2090     NEXT K
2100 STOP
```

```
REM METODO DE CROUT
```

```
FOR J = 2 TO N
  IF A(1, J) = 0 THEN 1925
  A(1, J) = A(1, J) / A(1, 1)
1925 NEXT J
  B(1) = B(1) / A(1, 1)
  FOR J = 2 TO N
    FOR I = J TO N
      FOR K = 1 TO J - 1
        IF A(I, K) = 0 THEN 1935
        A(I, J) = A(I, J) - A(I, K) * A(K, J)
1935 NEXT K
      NEXT I
    FOR I = J + 1 TO N

      FOR K = 1 TO J - 1
        A(J, I) = A(J, I) - A(J, K) * A(K, I)
      NEXT K
      A(J, I) = A(J, I) / A(J, J)
```

```
  A(J, I) = A(I, J) / A(J, J)
  NEXT I
  SUT = 0
  SUR = 0
1955 SUT = 0
  FOR K = 1 TO J - 1
    IF A(J, K) = 0 THEN 1965
    SUT = SUT + A(J, K) * B(K)
1965 NEXT K
  B(J) = (B(J) - SUT) / A(J, J)
  NEXT J
  H(N) = B(N)
  PRINT "H(N)="; H(N)
  FOR I = N - 1 TO 1 STEP -1
    SUR = 0
    FOR K = I + 1 TO N
      SUR = SUR + A(I, K) * H(K)
    NEXT K
    H(I) = B(I) - SUR
    PRINT "H("; I; ")="; H(I)
  NEXT I
```

```
ERASE A, B
```

```

2110 REM GAUSS-SEIDEL
2120 C = 0
2130 SU = 0
2140 FOR K = 1 TO N
2150 HK = H(K)
2160 FOR I = 1 TO N
2170 IF A(K, I) = 0 THEN 2210
2180 IF K = I THEN 2210
2190 SU = SU + (A(K, I) * H(I))
2200 H(K) = (B(K) - SU) / A(K, K)
2210 NEXT I
2220 SU = 0
2230 NEXT K
2240 C = C + 1
2250 PRINT "carga piezometrica h"; C; "("; N; ","; T; ")" ="; H(N)
2260 IF ABS(HK - H(N)) < .01 THEN 2280
2270 GOTO 2140
2280 C = 0
      PRINT "carga piezometrica h("; N; ","; T; ")" ="; H(N)
2290 ERASE A, B
2300 'BEEP
2310 NEXT T
2320 FOR J = 1 TO N
2330 PRINT
2340 PRINT "carga piezometrica h("; J; ","; T; ")" ="; H(J)
2350 NEXT J
2360 END

```