



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

REDES CERRADAS
SOLUCION NUMERICA
Y
COMPROBACION EXPERIMENTAL

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
I N G E N I E R O C I V I L
P R E S E N T A :

LUIS M. SALMONES HERNANDEZ



México, D. F.

1988



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

CONTENIDO

I. INTRODUCCION.	5
II. METODO NUMERICO.	9
2.1 Analisis Hidraulico de la Red.	12
2.2 Algoritmo.	15
2.2.1 Procedimiento.	
2.2.2 Serie de Taylor.	
2.2.3 Linealizacion.	
2.2.4 Matriz de Cargas.	
2.3 Programa.	29
2.3.1 Diagrama de flujo.	
2.3.2 Codificacion.	
III. MODELO HIDRAULICO.	37
3.1 Localizacion del modelo.	39
3.2 Descripcion del modelo.	40
3.3 Instrumentacion.	42
3.4 Calibracion.	44
3.4.1 Perdidas por friccion.	
3.4.2 Perdidas locales.	
3.4.3 Diafragmas como atoradores.	
3.5 Experimentacion.	62
3.5.1 Resultados experimentales.	
IV. COMPARACION DE RESULTADOS.	82
V. CONCLUSIONES.	96
APENDICE.	100
REFERENCIAS	110

I. INTRODUCCION

Durante muchos años, el cálculo y diseño de redes de tuberías, sean estas de suministro urbano de agua, gas, conductos de refrigeración y aire acondicionado, o cualquier proyecto en plantas industriales, se ha realizado en base a las ecuaciones elementales que gobiernan el movimiento de los fluidos. Con ellas, se ha llegado a desarrollar una gran variedad de modelos matemáticos, en los que se trata de aprovechar el conocimiento que se tiene sobre las leyes del movimiento de un fluido a través de conductos cerrados con el fin de resolver cualquier sistema mediante las variables o condiciones de un problema en particular y las relaciones que existen entre estas condiciones y las variables que son desconocidas. Esto quiere decir que, en cada caso, el problema se reduce a resolver un sistema de ecuaciones en particular.

Hasta antes de la aparición de las computadoras, el modelo matemático implicaba una gran cantidad de operaciones aritméticas y un procedimiento tedioso y complicado que facilitaba la existencia de errores acumulativos, los cuales hacían necesario repetir el proceso más de una vez. Con la llegada de las computadoras se dió un gran impulso a los modelos matemáticos, ya que las operaciones se realizan a gran velocidad, los procedimientos se plantean una sola vez y, por lo tanto, se disminuyeron los errores de operación y procedimiento. Es quizá por esta razón que los modelos físicos de redes no han tenido éxito como en otro tipo de problemas hidráulicos.

Dado que los modelos matemáticos son en esencia un instrumento para resolver un sistema de ecuaciones, se ha desarrollado un gran número de modelos que varían unos de otros en el algoritmo para resolver dicho sistema. Todo esto, al contrario de los modelos físicos ha producido una gran cantidad de informes técnicos al respecto.

Sin embargo, a pesar de todo lo anterior y de las ventajas que ello representa, es importante señalar que casi cualquier solución analítica de un fluido en movimiento requiere ser idealizada y en algunos casos el efecto de las simplificaciones hechas debe ser probado mediante la experimentación directa. En consecuencia, se ha incrementado la investigación en el campo de la Ingeniería Hidráulica con métodos experimentales que incluyen el uso de modelos a escala y analógicos.

En el caso de las redes de distribución esto no ha sucedido y este hecho provoca cierta inquietud de quienes deseamos despejar las dudas sobre la veracidad de los resultados obtenidos a través de cualquier procedimiento matemático. Por tal motivo, el presente trabajo pretende obtener argumentos válidos que permitan enjuiciar la bondad y confiabilidad de los modelos matemáticos.

Para el desarrollo de este trabajo, se ha dividido en cinco capítulos, siendo el primero de ellos la Introducción, donde se plantea el problema y los objetivos que se persiguen.

El segundo capítulo describe el método numérico utilizado, siendo este el propuesto por el Ing. José Luis Sánchez Bribiesca del Instituto de Ingeniería para la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, mismo que ya ha sido descrito en diversas publicaciones (Ref. 5, 6 y 7). Este método parte de encontrar una relación entre los valores de las variables, ya sean gastos o cargas piezométricas, en dos iteraciones sucesivas. 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 tercer capítulo trata sobre la localización, descripción y

experimentación del modelo físico de la red cerrada, llegando a la presentación de los ensayos respectivos y los resultados finales.

El capítulo cuatro consiste en la comparación de resultados experimentales con los obtenidos a partir del modelo matemático, incluyendo la representación gráfica de esta comparación. Así mismo, se muestran un par de ejemplos de la referencia 1, resueltos por el método de Hardy-Cross y comparados también con los resultados arrojados por el método numérico.

Finalmente, en el quinto y último capítulo se presentan las conclusiones del estudio realizado.

II. METODO NUMERICO

El análisis de una red cerrada consiste fundamentalmente en determinar los gastos que circulan a través de los tramos y los niveles piezométricos (energía disponible) en cada uno de los nudos, la cual debe satisfacer una demanda preestablecida. Además de las demandas, se conocen las características físicas de la red y de los elementos que la componen, así como una serie de condiciones de frontera (gastos de alimentación o niveles piezométricos en tanques de almacenamiento y regulación).

Tradicionalmente, se considera que tanto las demandas como las condiciones de frontera no varían con el tiempo, por lo que el análisis de la red se realiza en condiciones estáticas, sean las que representan el estado de la red en condiciones de demanda promedio, o las que representen condiciones de demanda máxima. Este enfoque

conduce a resultados aceptables, aunque en ocasiones es conveniente estudiar el comportamiento de la red en condiciones dinámicas; esto es, tomando en cuenta las variaciones temporales de la demanda y de las condiciones de frontera. Sin embargo, el modelo dinámico presenta todavía diversas dificultades que de acuerdo al análisis realizado puede conducir a soluciones erróneas, con un proceso que consume grandes recursos de cómputo.

Con mucha mejor información, es posible que el análisis dinámico fuese más confiable si se realiza en términos de un gran número de corridas en el modelo estático, el cual puede combinarse con algunos algoritmos optimizados.

El primer método para el análisis sistemático de una red de distribución 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 elementales. Un método similar fue diseñado por Cornish, quien ajusta las elevaciones piezométricas en los nudos en lugar de ajustar los caudales. Ambos métodos pueden aplicarse haciendo uso de una calculadora y, aun más, han sido programados con facilidad en computadora digital.

El progreso en las computadoras permitió el desarrollo de técnicas de análisis más sofisticadas y con ello la evolución de un gran número de modelos para el análisis de redes. En términos generales, estos modelos se basan en el método de Newton-Raphson, con sus distintas variantes para resolver el sistema de ecuaciones antes mencionado, después de haberla linealizado. Las diferencias entre los distintos modelos obedecen al criterio empleado para linealizar las ecuaciones del sistema y para la resolución del mismo.

2.1 ANALISIS HIDRAULICO DE LA RED.

El análisis del funcionamiento hidráulico consiste en resolver simultáneamente la ecuación de continuidad en los nudos y la ecuación de la energía en cada uno de los tramos.

a) Ecuación de continuidad .- En cada nudo i , se debe cumplir que:

$$(\sum Q)_i = 0 \quad (2.1)$$

donde

$(\sum Q)_i$ es la suma de gastos que inciden en el nudo i (por convención, los gastos que llegan al nudo son positivos y los que salen de él son negativos).

b) Ecuación de la energía .- Para cada tramo k que une el nudo i con el j, se tiene que:

$$z_i + \frac{P_i}{\gamma} + \frac{V_i^2}{2g} = z_j + \frac{P_j}{\gamma} + \frac{V_j^2}{2g} + hf_{i-j} \quad (2.2)$$

donde

$$z_i, z_j$$

carga de posición.

$$\frac{P_i}{\gamma}, \frac{P_j}{\gamma}$$

carga de presión.

$$\frac{V_i^2}{2g}, \frac{V_j^2}{2g}$$

carga de velocidad.

$$hf_{i-j}$$

perdida de carga por
fricción entre las secciones
i y j.

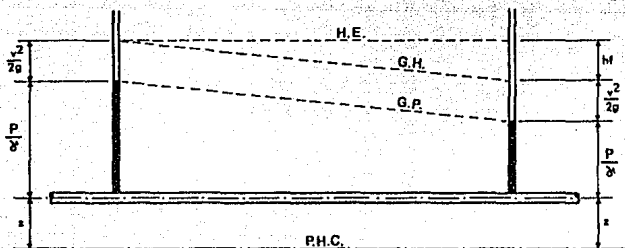


Fig. 2.1 Ecuación de la energía entre dos secciones de una tubería.

La utilización de las ecuaciones (2.1) y (2.2) para la solución de una red, nos lleva a un sistema de ecuaciones que podrá resolverse por medio de un método iterativo y la ayuda de la computadora.

Estos métodos se basan en la estimación de valores iniciales, teniendo tres alternativas:

- Estimación inicial de gastos.
- Estimación inicial de cargas.
- Estimación inicial simultánea de gastos y cargas.

En este caso, se ha elegido la primera opción, partiendo de valores iniciales de gastos que se aproximarán a la solución exacta mediante correcciones cíclicas.

2.2 ALGORITMO.

2.2.1 Procedimiento.

Con la ayuda de una red cerrada simple, como la mostrada en la figura 2.2, en la que se conoce el gasto total de dotación (Q_T) y los gastos requeridos en cada nudo (q_i), se inicia el analisis del problema con la finalidad de determinar la distribución de gastos (Q_k), los diametros de los tramos (D_k) y las cargas piezometricas por nudo (h_i).

Estimando una distribución inicial de gastos, se determinaran los diámetros de cada tramo, para lo cual se ha supuesto un valor de la velocidad:

$$Q_k = A_k \cdot V$$

$$\text{si } V = 1 \text{ m/s, entonces } Q_k = A_k$$

por lo que

$$\frac{D_k^2 \pi}{4} = Q_k$$

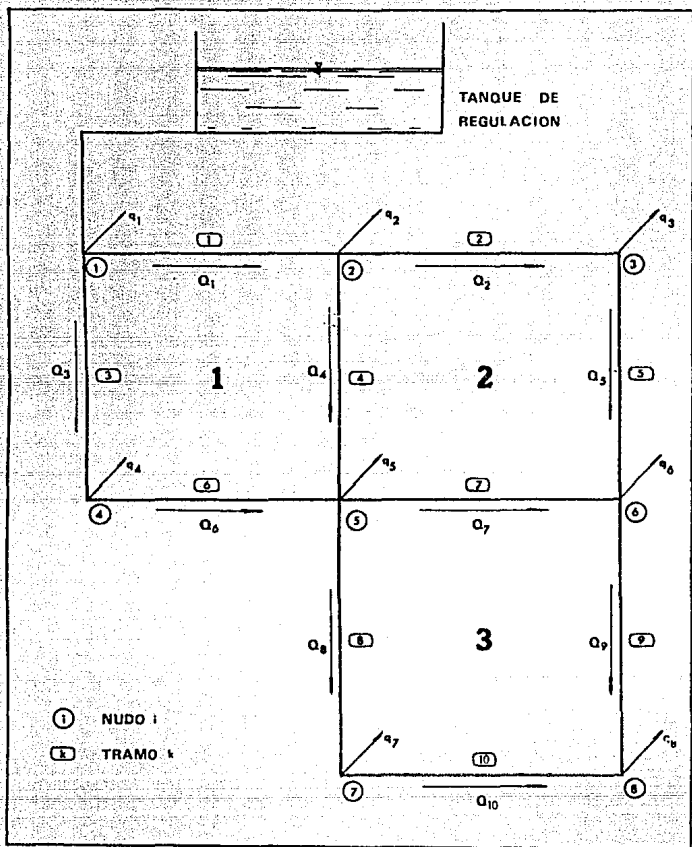


Fig. 2.2.- Distribución de Gastos de una Red Cerrada.

de donde

$$Dk = \sqrt{\frac{4 Qk}{\pi}} \quad (2.3)$$

Ahora, apoyándose en la distribución de gastos mostrada en la misma figura 2.2, y aplicando la ecuación (2.1) obtenemos el siguiente sistema de ecuaciones:

Nudo	Ecuación de continuidad
1	$Q_1 = Q_2 + Q_3 + q_1$
2	$Q_2 = Q_4 + Q_5 + q_2$
3	$Q_3 = Q_6 + q_3$
4	$Q_4 = Q_7 + q_4$
5	$Q_5 + Q_6 = Q_8 + Q_9 + q_5$
6	$Q_6 + Q_7 = Q_9 + q_6$
7	$Q_7 = Q_{10} + q_7$
8	$Q_8 + Q_{10} = q_8$

Tabla 2.1. Ecuación de continuidad en los nudos.

De la tabla 2.1 se observa que el sistema es incompatible, ya que son 8 ecuaciones con diez incógnitas, por lo que se hace indispensable el uso de la ecuación (2.2).

Para flujo permanente, en un tubo de diámetro constante, la

línea de cargas piezométricas es paralela al gradiente hidráulico e inclinada en la dirección del movimiento, por lo que:

$$V_i = V_j$$

y entonces

$$H_i = z_i + \frac{P_i}{\gamma} \quad \text{y} \quad H_j = z_j + \frac{P_j}{\gamma}$$

y la pérdida de energía será

$$h_{f(i-j)} = H_i - H_j \quad (2.4)$$

Utilizando la fórmula de Darcy-Weisbach para el cálculo de dicha pérdida:

$$h_{f(i-j)} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2.5)$$

donde

- f factor de fricción, sin dimensiones.
- g aceleración de la gravedad, en m/s^2 .
- $h_{f(i-j)}$ pérdida por fricción, en m.
- D diámetro, en m.
- L longitud del tramo $i-j$, en m.
- V velocidad media, en m/s .

Relacionando las ecuaciones (2.4) y (2.5)

$$H_i - H_j = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2.6)$$

si se considera flujo permanente e incompresible:

$$Q = AV = \text{cte.} \quad \text{y} \quad v = \frac{Q}{A}$$

por lo que

$$v^2 = \frac{Q^2}{A^2} \quad (2.7)$$

sustituyendo (2.7) en (2.6)

$$H_i - H_j = f \frac{L}{D} \frac{Q^3 k^2}{2gA^5} \quad (2.8)$$

Ahora, si se define

$$C_k = f \frac{L}{D} \frac{1}{2gA^5} \quad (2.9)$$

la ecuación (2.8) nos queda

$$H_i - H_j = C_k Q k^2$$

o sea que

$$Q k = \sqrt{\frac{H_i - H_j}{C_k}} \quad (2.10)$$

Sustituyendo la ecuación (2.10) en la de continuidad, el sistema incompatible de la tabla 2.1 se convierte en uno compatible, mismo que aparece en la tabla 2.2.

Este último sistema, sin embargo, no es lineal, por lo que el problema no ha sido resuelto.

A pesar de lo anterior, el camino hasta ahora seguido es

correcto, ya que existen herramientas matemáticas que permitirán salvar este nuevo obstáculo. La serie de Taylor es una de ellas y será la utilizada en este caso.

Nudo	Ecuación de continuidad
1	$Q_T = \sqrt{\frac{H_1 - H_2}{C_1}} + \sqrt{\frac{H_1 - H_4}{C_3}} + q_1$
2	$\sqrt{\frac{H_1 - H_2}{C_1}} = \sqrt{\frac{H_2 - H_3}{C_2}} + \sqrt{\frac{H_2 - H_5}{C_4}} + q_2$
3	$\sqrt{\frac{H_2 - H_3}{C_2}} = \sqrt{\frac{H_3 - H_6}{C_5}} + q_3$
4	$\sqrt{\frac{H_1 - H_4}{C_3}} = \sqrt{\frac{H_4 - H_5}{C_6}} + q_4$
5	$\sqrt{\frac{H_2 - H_5}{C_4}} + \sqrt{\frac{H_4 - H_5}{C_6}} = \sqrt{\frac{H_5 - H_6}{C_7}} + \sqrt{\frac{H_5 - H_7}{C_8}} + q_5$
6	$\sqrt{\frac{H_3 - H_6}{C_5}} + \sqrt{\frac{H_5 - H_6}{C_7}} = \sqrt{\frac{H_6 - H_8}{C_9}} + q_6$
7	$\sqrt{\frac{H_5 - H_7}{C_8}} = \sqrt{\frac{H_7 - H_8}{C_{10}}} + q_7$
8	$\sqrt{\frac{H_6 - H_8}{C_9}} + \sqrt{\frac{H_7 - H_8}{C_{10}}} = q_8$

Tabla 2.2. Sistema de ecuaciones compatible, no lineal.

2.2.2 Serie de Taylor.

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

$$f(x) = a_0 + a_1(x-a) + a_2(x-a)^2 + \dots + a_n(x-a)^n + \dots \quad (2.11)$$

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

Haciendo en la ecuación (2.11), $x = a$, se obtiene $a_0 = f(a)$, que es el primer coeficiente. Para obtener los restantes se toman las derivadas sucesivas de la ec. (2.11).

$$f'(x) = a_1 + 2a_2(x-a) + 3a_3(x-a)^2 + 4a_4(x-a)^3 + \dots$$

$$f''(x) = 2a_2 + 2 \cdot 3a_3(x-a) + 3 \cdot 4a_4(x-a)^2 + \dots$$

$$f'''(x) = 2 \cdot 3a_3 + 2 \cdot 3 \cdot 4a_4(x-a) + \dots$$

$$\dots \dots \dots$$

$$\dots \dots \dots$$

$$f^{(n)}(x) = n!a_n + \dots \dots \dots$$

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

$$a_1 = f'(a)$$

$$a_2 = \frac{f''(a)}{2!}$$

$$a_3 = \frac{f'''(a)}{3!}$$

$$a_n = \frac{f^{(n)}(a)}{n!}$$

Llevando estos resultados a la ecuación (2.11), se llega a la siguiente expresión:

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

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

A partir del desarrollo anterior, se puede aproximar la función mediante un polinomio del grado que se desee. Es claro que tomando más términos de la serie se obtiene una mejor aproximación.

2.2.3 Linealización.

Regresando a nuestro problema, y con la ayuda de la función $f(z)$, que definiremos más adelante, se tiene lo siguiente:

Sea z^j un valor cualquiera de z y

$$z^{j+1} = z^j + \Delta z$$

el desarrollo en serie de Taylor es

$$f(z^j + \Delta z) = f(z^j) + \frac{f'(z^j)\Delta z}{1!} + \frac{f''(z^j)\Delta z^2}{2!} + \dots$$

despreciando los términos de orden superior

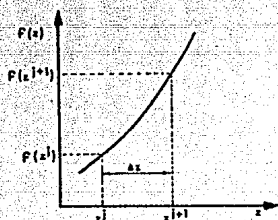


Fig.2.3. Gráfica de la función $f(z)$.

$$f(z^{j+1}) = f(z^j) + f'(z^j)\Delta z \quad (2.12)$$

Sea pues la función $f(z)$ definida a continuación:

$$z = H_i - H_j \quad \text{por lo que} \quad z = Ck Qk^{\frac{1}{2}}$$

y entonces

$$Qk = \sqrt{\frac{z}{Ck}} \quad \text{y} \quad f(z) = \sqrt{\frac{z}{Ck}}$$

por lo tanto

$$f(z^{j+1}) = Q^{j+1} \quad (2.13)$$

$$f(z^j) = Q^j \quad (2.14)$$

y la primera derivada

$$f'(z^j) = \frac{1}{2 C^{\frac{1}{2}}} (z^j)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$

sustituyendo las ecuaciones (2.13), (2.14) y (2.15) en la (2.12)

$$Q^{j+1} = Q^j + \frac{1}{2 C^{\frac{1}{2}}} (z^j)^{-\frac{1}{2}} (z^{j+1} - z^j)$$

desarrollando:

$$Q^{j+1} = Q^j + \frac{z^{j+1}}{2 C^{\frac{1}{2}} (z^j)^{\frac{1}{2}}} - \frac{(z^j)^{\frac{1}{2}}}{2 C^{\frac{1}{2}}}$$

multiplicando el segundo término del segundo miembro por $\frac{C^{\frac{1}{2}}}{C^{\frac{1}{2}}}$:

$$Q^{j+1} = Q^j + \frac{z^{j+1} C^{\frac{1}{2}}}{2 C (z^j)^{\frac{1}{2}}} - \frac{(z^j)^{\frac{1}{2}}}{2 C^{\frac{1}{2}}}$$

pero

$$\omega = \left(\frac{z}{C} \right)^{\frac{1}{2}}$$

por lo que

$$Q^{j+1} = Q^j + \frac{z^{j+1}(1)}{2C Q^j} - \frac{Q^j}{2}$$

$$Q^{j+1} = \frac{Q^j}{2} + \frac{z^{j+1}}{2C Q^j}$$

si $z^{j+1} = (H_i - H_j)^{j+1}$, entonces:

$$Q_k^{j+1} = \frac{Q_k^j}{2} + \frac{(H_i - H_j)^{j+1}}{2C_k Q_k^j}$$

si ahora definimos:

$$\alpha_k^j = \frac{1}{2C_k Q_k^j} \quad (2.16)$$

tendremos finalmente que:

$$Q_k^{j+1} = \frac{Q_k^j}{2} + \alpha_k^j (H_i - H_j)^{j+1} \quad (2.17)$$

en donde

- Q_k^j gasto en el tramo k , en la iteración j .
- Q_k^{j+1} gasto en el tramo k , en la iteración $j+1$.
- $(H_i - H_j)^{j+1}$ diferencia de cargas entre los nudos i y j , en la iteración $j+1$.

2.2.4 Matriz de cargas.

Hasta aquí, se han desarrollado las ecuaciones de continuidad y de la energía para obtener un sistema compatible que permita resolver el problema. Dicho sistema se armará con la ayuda de las ecuaciones hasta ahora desarrolladas y tendrá por incógnitas las cargas en los nudos, siendo esta la razón por la que llamaremos al sistema "Matriz de cargas". Las ecuaciones utilizadas serán la (2.9), (2.16) y (2.17).

Antes de formar la matriz, es conveniente tener un cuadro que relacione los nudos y tramos a través de la ecuación de continuidad. He aquí, entonces, tal cuadro:

Tramo Nudo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	$-Q_1$	—	$-Q_2$	—	—	—	—	—	—	—	q_1
2	Q_1	$-Q_2$	—	$-Q_4$	—	—	—	—	—	—	q_2
3	—	Q_2	—	—	$-Q_5$	—	—	—	—	—	q_3
4	—	—	Q_3	—	—	$-Q_6$	—	—	—	—	q_4
5	—	—	—	Q_4	—	Q_6	$-Q_7$	$-Q_8$	—	—	q_5
6	—	—	—	—	Q_5	—	Q_7	—	$-Q_9$	—	q_6
7	—	—	—	—	—	—	—	Q_8	—	$-Q_{10}$	q_7
8	—	—	—	—	—	—	—	—	Q_9	Q_{10}	q_8

Tabla 2.3 Ecuación de continuidad en nudos y tramos.

Ahora bien, con la ayuda de la tabla 2.3 se formara la matriz de cargas siguiendo el procedimiento que a continuación se detalla:

1. Para cada uno de los nudos, se planteara la ecuacion (2.17), para todos los gastos que incidan en el. Así, para el nudo uno se tendra que:

$$Q_1^{j+1} = \frac{Q_1^j}{2} + \alpha_1 (H_1 - H_2)^{j+1}$$

$$Q_9^{j+1} = -\frac{Q_9^j}{2} + \alpha_9 (H_1 - H_4)^{j+1}$$

desarrollando ambas ecuaciones:

$$Q_1^{j+1} = \frac{Q_1^j}{2} + \alpha_1 H_1^{j+1} - \alpha_1 H_2^{j+1} \quad (2.16)$$

$$Q_9^{j+1} = -\frac{Q_9^j}{2} + \alpha_9 H_1^{j+1} - \alpha_9 H_4^{j+1} \quad (2.17)$$

2. Tomando en cuenta los signos de los gastos, se relacionan las ecuaciones obtenidas y el gasto extraído. Continuando con el nudo uno:

$$-\frac{Q_1^j}{2} - \alpha_1 H_1^{j+1} + \alpha_1 H_2^{j+1} - \frac{Q_9^j}{2} - \alpha_9 H_1^{j+1} + \alpha_9 H_4^{j+1} = q_1$$

ordenando:

$$-\alpha_1 H_1^{j+1} + \alpha_1 H_2^{j+1} - \alpha_9 H_1^{j+1} + \alpha_9 H_4^{j+1} = q_1 + \frac{Q_1^j}{2} + \frac{Q_9^j}{2} \quad (2.20)$$

La ecuacion (2.20) es la primera de las que formaran el sistema

3. Una vez que se tiene el sistema de ecuaciones, se armará la matriz con los coeficientes α y el término independiente.

Analizando el nudo uno:

$$\begin{aligned} \text{Coeficientes de } H_1^{j+1}: & -\alpha_1 \quad -\alpha_3 \\ \text{Coeficientes de } H_2^{j+1}: & \alpha_1 \\ \text{Coeficientes de } H_3^{j+1}: & \alpha_3 \\ \text{Término independiente:} & q_1 + \frac{Q_1^j}{2} + \frac{Q_3^j}{2} \end{aligned}$$

Para facilitar el manejo de la matriz, llevemosla a una tabla como la siguiente:

carga nudo	H_1^{j+1}	H_2^{j+1}	H_3^{j+1}	H_4^{j+1}	H_5^{j+1}	H_6^{j+1}	H_7^{j+1}	H_8^{j+1}	Término independiente.
1	$-\alpha_1$ $-\alpha_3$	α_1	0	α_3	0	0	0	0	$q_1 + \frac{Q_1}{2} + \frac{Q_3}{2} - Q_7$
2	α_1	$-\alpha_1 - \alpha_4$ $-\alpha_2$	α_2	α_4	0	0	0	0	$q_2 + \frac{Q_2}{2} + \frac{Q_4}{2} - \frac{Q}{2}$
3	0	α_2	$-\alpha_2$ $-\alpha_5$	0	α_5	0	0	0	$q_3 + \frac{Q_5}{2} - \frac{Q_2}{2}$
4	α_3	0	0	$-\alpha_3$ $-\alpha_6$	α_6	0	0	0	$q_4 + \frac{Q_6}{2} - \frac{Q_3}{2}$
5	0	α_4	0	α_6	$-\alpha_4 - \alpha_7$ $-\alpha_6 - \alpha_8$	α_7	α_8	0	$q_5 + \frac{Q_7}{2} + \frac{Q_8}{2} - \frac{Q_4}{2} - \frac{Q_6}{2}$
6	0	0	α_5	0	α_7	$-\alpha_5 - \alpha_9$ $-\alpha_7$	0	α_9	$q_6 + \frac{Q_9}{2} - \frac{Q_5}{2} - \frac{Q_7}{2}$
7	0	0	0	0	α_8	0	$-\alpha_8$ $-\alpha_{10}$	α_{10}	$q_7 + \frac{Q_{10}}{2} - \frac{Q_8}{2}$
8	0	0	0	0	0	α_9	α_{10}	$-\alpha_9$ $-\alpha_{10}$	$q_8 + \frac{Q_9}{2} - \frac{Q_{10}}{2}$

Tabla 24 Matriz de cargas.

2.3 PROGRAMA.

Una vez que se tienen los elementos necesarios, se procederá a la estructuración de un programa de computadora, ya que se trata de un problema cuya solución se obtiene a través de correcciones cíclicas.

2.3.1 Diagrama de flujo.

La secuencia de cálculo será de la siguiente manera:

1. Proporcionar la tolerancia que se desee, así como los datos de todos los nudos y tramos como a continuación se indica:

a) Nudos: Se deben tener los gastos que llegan y los que salen de cada nudo, llamando $Q(2)I$ a los primeros y $Q(1)I$ a los segundos. Estos son los gastos de aportación y demanda de la red en su conjunto.

b) Tramos: Para cada tramo se requiere conocer el gasto que circula por el (valor estimado), el diametro, la longitud, y los nudos inicial y final.

2. Con todos los datos mencionados, se hará el cálculo de los valores de C_k con la ecuación (2.9), y con ellos se hará el cálculo de todas las o_k (ecuación (2.16)) utilizando como Q_k^1 a los gastos estimados.

3. El siguiente paso es armar la matriz de cargas y resolverla por cualquier método que se desee (en el programa elaborado en este trabajo se utilizó Gauss-Seidel).

4. Con los valores de H_i^{j+1} obtenidos, se utilizará la ecuación (2.17) para determinar el gasto Q_k^{j+1} y compararlo con el Q_k^j . Si la diferencia entre ambos está dentro de la tolerancia, el cálculo ha terminado; en caso contrario, tomaremos los nuevos gastos para calcular los C_k y α_k y regresar al paso 3.

El diagrama de flujo correspondiente se muestra en la figura 2.4.

2.3.2 Codificación.

El programa se ha codificado en lenguaje BASIC y cargado en una computadora personal IBM de 512 Kb. A continuación aparece el listado respectivo.

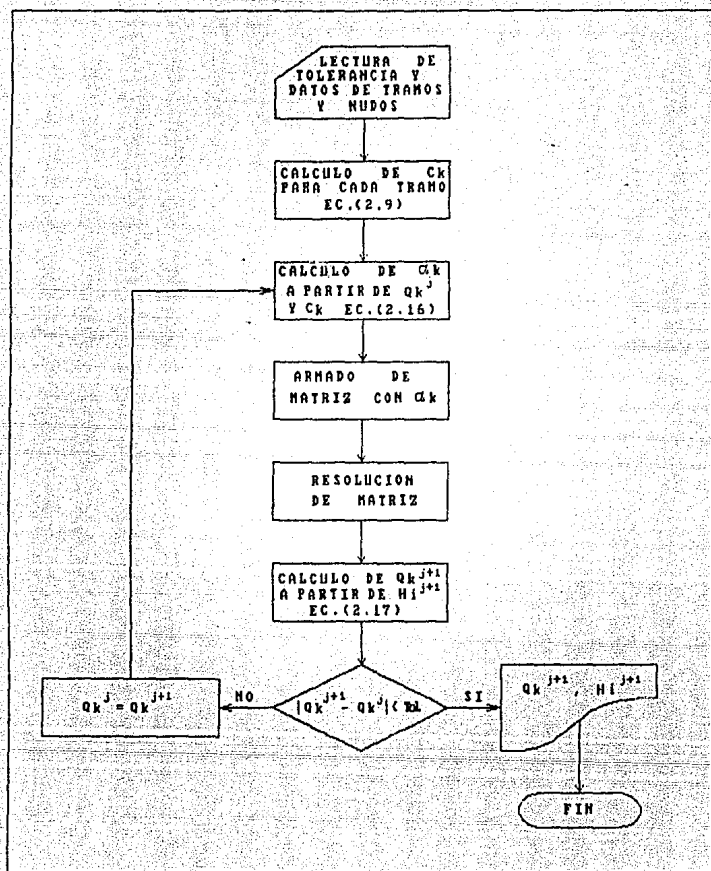


Figura 24 Diagrama de flujo.

```

10 *****
*****
20 ***** REDES CERRADAS ***
*****
30 ***** ***
*****
40 ***** Luis M. Salmones H. ***
*****
50 *****
*****
60 KEY OFF:TEX=15:TEX1=14:TEX2=13:TEX4=31:FON=1:MAR=9
70 CLS:WIDTH 40:COLOR TEX,FON,MAR:CLS:LOCATE 12,13:COLOR TEX2:PRINT "REDE
S CERRADAS"
80 FOR CON=1 TO 2500:NEXT CON:CLS:WIDTH 80:COLOR TEX,FON,MAR:CLS:LO=-2,LO
G(10)
90 DIM QT(50),L(50),NI(50),NF(50),D(50),A(50),V(50),QD(50),QA(50),C(50),A
LFA(50),B(50),M(50,50),X(50),QC(50)
100 COLOR TEX:LOCATE 3,28:PRINT "REDES CERRADAS":COLOR TEX2
110 LOCATE 5,1:PRINT "Se hara el calculo de la red con base a valores ini
ciales del gasto, mismos que"
120 PRINT "se aproximaran a la solucion exacta mediante correcciones cicli
cas a través del":PRINT "balance de cargas,"
130 COLOR TEX:LOCATE 10,15:PRINT "MATERIAL DE LA TUBERIA":COLOR TEX1
140 LOCATE 13,15:PRINT "1) Cobre.":LOCATE 14,15:PRINT "2) Fierro fundido
nuevo."
150 LOCATE 15,15:PRINT "3) Fierro fundido semoxidado."
160 LOCATE 16,15:PRINT "4) Acero.":LOCATE 17,15:PRINT "5) Cemento liso.":
LOCATE 18,15:PRINT "6) Asbesto-cemento."
170 LOCATE 19,15:PRINT "7) Concreto."
180 COLOR TEX2:LOCATE 21,20:PRINT "Opcion deseada: ";
190 RS=INPUT$(1):DF=VAL(RS):PRINT DF:IF DF=0 OR DF>7 THEN BEEP:GOTO 180
200 ON DF GOSUB 2020,2030,2040,2050,2060,2070,2080
210 BEEP:COLOR TEX:LOCATE 12+DF,50:PRINT "Rugosidad =" USING "#.###":E:;
PRINT " mm"
220 E=E/1000:FOR CON=1 TO 2500:NEXT CON:CLS
230 LOCATE 6,25:PRINT "CARACTERISTICAS DE LA RED":COLOR TEX2
240 COLOR TEX1:LOCATE 12,15:INPUT "Número de tramos.":NT
250 LOCATE 15,15:INPUT "Número de nudos.":NP
260 VI=.0000011:CLS
270 FOR I=1 TO NT
280 COLOR TEX:LOCATE 7,30:PRINT "TRAMO #":I:COLOR TEX1
290 LOCATE 10,15:INPUT "Gasto (l/s) =" :QT(I)
300 LOCATE 12,15:INPUT "Diametro (m) =" :D(I)
310 LOCATE 14,15:INPUT "Longitud (m) =" :L(I)
320 LOCATE 16,15:INPUT "Nudo inicial ":NI(I)
330 LOCATE 18,15:INPUT "Nudo final ":NF(I):CLS
340 NEXT I
350 RAYO=" "
360 GOSUB 2190
370 FOR I=1 TO NT
380 LIN=CSRLIN:IF LIN=20 THEN LOCATE LIN,10:COLOR TEX2:PRINT RAYO:COLORS
TEX1:PRINT " Cualquier tecla para continuar....":AA$=INPUT$(1):GOS
UB 2190
390 LIN=CSRLIN
400 LOCATE LIN,11:PRINT I:LOCATE LIN,18:PRINT NI(I):LOCATE LIN,25:PRINT N
F(I):LOCATE LIN,34:PRINT L(I)
410 LOCATE LIN,47:PRINT USING "#.###":D(I):LOCATE LIN,57:PRINT USING"####
.###":QT(I)
420 NEXT I

```

```

430 LOCATE LIN+1,10:COLOR TEX2:PRINT RAY0%
440 COLOR TEX1:LOCATE LIN+3,15:PRINT "Están correctos todos los datos ? (S
/NI)";
450 D$=INPUT$(1):PRINT D$
460 IF D$="N" OR D$="n" THEN 2240
470 IF D$="S" OR D$="s" THEN 490
480 BEEP:BEEP:GOTO 440
490 FOR I=1 TO NT
500 QT(I)=DT(I)/1000
510 A(I)=D(I)-2*.785398:V(I)=DT(I)/A(I)
520 NEXT I
530 CLS:COLOR TEX1:LOCATE 5,28:PRINT "GASTOS DE DEMANDA"
540 LOCATE 7,32:PRINT "NUDO #"
550 FOR I=1 TO NN:COLOR TEX
560 LOCATE 7,40:PRINT I:COLOR TEX1
570 LOCATE 11,28:INPUT "Gasto (1/s) =":QD(I):COLOR I:LOCATE 11,41:PRINT "
000000000000"
580 NEXT I
590 CLS:COLOR TEX1:LOCATE 5,25:PRINT "GASTOS DE ALIMENTACION":COLOR TEX1
600 LOCATE 10,20:INPUT "Numero de nudos con alimentacion ":NA:CLS
610 IF NA=0 OR NA>NN THEN BEEP:GOTO 590
620 FOR J=1 TO NA
630 COLOR TEX1:LOCATE 5,25:PRINT "GASTOS DE ALIMENTACION":COLOR TEX1
640 LOCATE 9,30:INPUT "Nudo ":I:IF I<0 OR I>NN THEN BEEP:GOTO 640
650 LOCATE 12,25:INPUT "Gasto (1/s) =":QA(I):CLS
660 NEXT J
670 RAY2$="
680 GOSUB 2320
690 FOR I=1 TO NN
700 LIN=CSRLIN:IF LIN=21 THEN LOCATE LIN,15:COLOR TEX2:PRINT RAY2$:COLOR
TEX1:PRINT "Cualquier tecla para continuar....":AA$:INPUT$(1):GOSUB 2320
710 LIN=CSRLIN
720 LOCATE LIN,11:PRINT I:LOCATE LIN,30:PRINT QD(I):LOCATE LIN,56:PRINT Q
A(I)
730 NEXT I
740 LOCATE LIN+1,10:COLOR TEX2:PRINT RAY2%
750 COLOR TEX1:LOCATE LIN+3,15:PRINT "Están correctos todos los datos ? (S
/NI)";
760 E$=INPUT$(1):PRINT E$
770 IF E$="N" OR E$="n" THEN 2370
780 IF E$="S" OR E$="s" THEN 800
790 BEEP:BEEP:GOTO 750
800 FOR J=1 TO NN
810 QD(I)=QD(I)/1000:QA(I)=QA(I)/1000
820 NEXT I
830 CLS:COLOR TEX1:LOCATE 20,20:PRINT "Realizando el calculo.....espere u
n momento":LOCATE 22,30:PRINT "Iteracion ...":ITER
840 FOR I=1 TO NT
850 R=ABS(V(I))*D(I)/V1
860 IF R=2700 THEN F=64/R:GOTO 920
870 IF R=100000 THEN F=.3164/(R^125):GOTO 920
880 X=(E-D(I))/3.71:F=.015
890 Y=2.51/(R*SQR(F)):W=LOG(X+Y)
900 N=(1/W)^2:IF ABS(F-N)>.0001 THEN 920
910 F=N:GOTO 940
920 C(I)=F*L(I)/D(I)*A(I)^2*19.62
930 ALFA(I)=1/(2*C(I)*ABS(QD(I)))
940 NEXT I
950 FOR J=1 TO NN
960 C(I)=QD(I)-QA(I)

```

```

970 FOR J=1 TO NN
980 M(I,J)=0
990 NEXT J
1000 NEXT I
1010 FOR I=1 TO NN
1020 FOR K=1 TO NT
1030 IF NI(K)=1 THEN 1060
1040 IF NF(K)=1 THEN 1100
1050 GOTO 1130
1060 M(I,J)=M(I,I)-ALFA(K)
1070 M(I,NF(K))=ALFA(K)
1080 B(I)=B(I)+QT(K)/2
1090 GOTO 1130
1100 M(I,I)=M(I,I)-ALFA(K)
1110 M(I,NI(K))=ALFA(K)
1120 B(I)=B(I)-QT(K)/2
1130 NEXT K
1140 NEXT I
1150 ***** RESOLUCION DE LA MATRIZ *****
1160 FOR CO=1 TO NN
1170 PV=M(CO,CO): IF ABS(PV) < 9.999999E-21 THEN 1950
1180 FOR JJ=1 TO NN: M(CO,JJ)=M(CO,JJ)/PV: NEXT JJ
1190 B(CO)=B(CO)/PV
1200 FOR II=1 TO NN: IF II=CO THEN 1240
1210 C=M(II,CO): M(II,CO)=0
1220 FOR JJ=1 TO NN: M(II,JJ)=M(II,JJ)-C*M(CO,JJ): NEXT JJ
1230 B(II)=B(II)-C*B(CO)
1240 NEXT II
1250 NEXT CO
1260 FOR I=1 TO NN: X(I)=B(I): NEXT I
1270 FOR K=1 TO NT
1280 H1=M1(K): H2=NF(K)
1290 QC(K)=(QT(K)/2+(X(H1)-X(H2))*ALFA(K)
1300 NEXT K
1310 FOR K=1 TO NT
1320 IF ABS(QC(K)-QT(K)) < .00001 THEN 1340
1330 ITER=ITER+1: LOCATE 22,30: PRINT "Iteration ...": ITER: GOTO 1980
1340 NEXT K
1350 FOR I=1 TO NT
1360 V(I)=QC(I)/A(I)
1370 QC(I)=QC(I)*1000
1380 NEXT I: CLS
1390 CLS: BEEP: BEEP: WIDTH 40: COLOR TEX,FON, MAR: CLS: LOCATE 15,15: PRINT "RES
ULTADOS"
1400 FOR CON=1 TO 1500: NEXT CON: CLS: WIDTH 80: COLOR TEX,FON, MAR: CLS
1410 RAY$=""
1420 GOSUB 2090
1430 FOR I=1 TO NT
1440 LIN=CSRLIN: IF LIN=21 THEN LOCATE LIN,5: COLOR TEX2: PRINT RAY$: COLOR T
EX1: PRINT "          Cualquier tecla para continuar....": AAF=INPUT$(1): GOSUB
B 2090
1450 LIN=CSRLIN
1460 LOCATE LIN,6: PRINT I: LOCATE LIN,13: PRINT NI(I): LOCATE LIN,20: PRINT N
F(I): LOCATE LIN,30: PRINT L(I)
1470 LOCATE LIN,42: PRINT USING "###.###": D(I): LOCATE LIN,55: PRINT USING "###.
###": V(I): LOCATE LIN,64: PRINT USING "#####.###": QC(I)
1480 NEXT I
1490 LOCATE LIN+1,5: COLOR TEX2: PRINT RAY$
1500 LOCATE LIN+3,15: PRINT "Cualquier tecla para continuar....": AAF=INPU

```



```

1510 GOSUB 2420
1520 RAY1$=" "
1530 GOSUB 2140
1540 FOR I=1 TO NN
1550 LIN=CSRLIN:IF LIN=21 THEN LOCATE LIN,30:COLOR TEX2:PRINT RAY1$:COLOR
    TEX1:PRINT "Cualquier tecla para continuar....":AA$=INPUT$(1):GOSUB 214
    0
1560 LIN=CSRLIN
1570 LOCATE LIN,34:PRINT I:LOCATE LIN,44:PRINT USING"##.##":X(I)
1580 NEXT I
1590 LOCATE LIN+1,30:COLOR TEX2:PRINT RAY1$
1600 COLOR TEX2:LOCATE 22,5:PRINT "Deseas impresion de resultados ? (S/N)
    "
1610 C$=INPUT$(1):PRINT C$
1620 IF C$="N" OR C$="n" THEN 1650
1630 IF C$="S" OR C$="s" THEN 1710
1640 BEEP:BEEP:GOTO 1600
1650 LOCATE 23,5:PRINT "Algun otro calculo (S/N) "
1660 B$=INPUT$(1):PRINT B$
1670 IF B$="N" OR B$="n" THEN 1700
1680 IF B$="S" OR B$="s" THEN ITER=0:GOTO 80
1690 BEEP:GOTO 1650
1700 CLS:LOCATE 12,30:PRINT "F I N   D E L   P R O G R A M A":FOR CON=1 T
    O 2000:NEXT CON:CLS:END
1710 LPRINT CHR$(14),"REDES CERRADAS"
1720 LPRINT :LPRINT :LPRINT CHR$(27)"E"
1730 LPRINT "
    RESULTADOS"
1740 LPRINT :LPRINT CHR$(27)"F"
1750 LPRINT "
    =====
1760 LPRINT "
    Tramo      N. I.      N. F.      Longitud      Diametro      Vel
    ocidad      Gasto
    (77) LPRINT "
    (m/s)      (l/s)"
    =====
1780 FOR I=1 TO NI
1800 LPRINT TAB(7):I;TAB(15);NI(I);TAB(23);NF(I);TAB(32);L(I);:LPRINT TAB
    (46) USING"#.####":D(I);:LPRINT TAB(60) USING"##.##":V(I);:LPRINT TAB(68)
    USING"#####":QC(I)
1810 NEXT I
1820 LPRINT "
    =====
1830 LPRINT :LPRINT :LPRINT CHR$(27)"E"
1840 LPRINT "
    C A R G A S   E N   L O S   N U D O S"
1850 LPRINT CHR$(27)"F"
1860 LPRINT "
    =====
1870 LPRINT "
    Nudo
1880 LPRINT "
    Carga"
    (m) "
1890 LPRINT "
    =====
1900 FOR I=1 TO NN
1910 LPRINT TAB(25):I;:LPRINT TAB(47) USING"##.##":X(I)
1920 NEXT I
1930 LPRINT "
    =====
1940 GOTO 1650
1950 CLS:COLOR TEX: LOCATE 12,30:PRINT "F I N   H A T R I Z   E S"

```

```

1960 LOCATE 16,30:PRINT " S I N G U L A R "
1970 FOR CON=1 TO 2500:NEXT CON:CLS:GOTO 1650
1980 FOR K=1 TO 17
1990 QT(1)=QC(Q):V(1)=QT(1)/A(1)
2000 NEXT K
2010 GOTO 840
2020 E=.0015:RETURN
2030 E=.000001E-03:RETURN
2040 E=.015:RETURN
2050 E=.07:RETURN
2060 E=.005:RETURN
2070 E=.025:RETURN
2080 E=.18:RETURN
2090 CLS:COLOR TEX:LOCATE 3,31:PRINT " R E S U L T A D O S ":COLOR TEX2
2100 LOCATE 5,5:PRINT "Tramo    NI      NF      Longitud      Diametro      Ve
locidad      Gasto"
2110 LOCATE 6,5:PRINT "          "          (m)          (m)
(m/s)      (l/s)
2120 LOCATE 7,5:COLOR TEX2:PRINT RAY4:PRINT :COLOR TEX1
2130 RETURN
2140 CLS:COLOR TEX:LOCATE 3,30:PRINT "CARGAS EN LOS NUDOS":COLOR TEX2
2150 LOCATE 7,33:PRINT "Nudo      Carga"
2160 LOCATE 8,33:PRINT "          (m)"
2170 LOCATE 9,30:COLOR TEX2:PRINT RAY15:PRINT :COLOR TEX1
2180 RETURN
2190 CLS:COLOR TEX:LOCATE 3,30:PRINT " D A T O S ":COLOR TEX2
2200 LOCATE 5,10:PRINT "Tramo    NI      NF      Longitud      Diametro
Gasto"
2210 LOCATE 6,10:PRINT "          "          (m)          (m)
(l/s)
2220 LOCATE 7,10:COLOR TEX2:PRINT RAY3:COLOR TEX1:PRINT
2230 RETURN
2240 LOCATE LIN+5,15:INPUT "Tramo por corregir ?";I
2250 CLS:COLOR TEX:LOCATE 7,30:PRINT "TRAMO #";I:COLOR TEX1
2260 LOCATE 10,15:INPUT "Gasto (l/s) =";QT(1)
2270 LOCATE 12,15:INPUT "Diametro (m) =";E(1)
2280 LOCATE 14,15:INPUT "Longitud (m) =";L(1)
2290 LOCATE 16,15:INPUT "Nudo inicial ";NI(1)
2300 LOCATE 18,15:INPUT "Nudo final ";NF(1):CLS
2310 GOTO 360
2320 CLS:COLOR TEX:LOCATE 3,30:PRINT "GASTOS EN LOS NUDOS":COLOR TEX2
2330 LOCATE 5,10:PRINT "Nudo      Gasto de demanda      Gasto de a
limentacion"
2340 LOCATE 6,10:PRINT "          "          (l/s)          (l/
s)"
2350 LOCATE 7,10:COLOR TEX2:PRINT RAY23:COLOR TEX1:PRINT
2360 RETURN
2370 LOCATE LIN+5,15:INPUT "Nudo por corregir ?";I
2380 CLS:COLOR TEX:LOCATE 8,30:PRINT "NUDO #";I:COLOR TEX1
2390 LOCATE 12,25:INPUT "Gasto de demanda (l/s) =";QD(I)
2400 LOCATE 14,25:INPUT "Gasto de alimentacion (l/s) =";QA(I):CLS
2410 GOTO 670
2420 RO=X(1)
2430 FOR I=2 TO UN
2440 IF RO=X(I) THEN RO=X(I)
2450 NEXT I
2460 CH=13
2470 CLS:COLOR TEX:LOCATE 7,25:PRINT "NECESIDADES DE CARGA :COLOR TEX1
1480 LOCATE 6,15:PRINT "1) Carga minima deseada."
2490 LOCATE 7,15:PRINT "2) Carga minima permitida (P.G.D.O.H.)."

```

```

2500 LOCATE 9,15:PRINT "3) Carga obligada en un nudo."
2510 COLOR TEAL:LOCATE 10,30:PRINT "Opcion deseada ";
2520 DE=INPUT$(1);DE=y4L(09):PRINT DE:IF DE=0 OR DE>3 THEN BEEP:GOTO 2510
2530 COLOR IE:1
2540 ON DE GOSUB 2560,2570,2600
2550 GOTO 2640
2560 LOCATE 15,15:INPUT "Carga minima (m.c.a.): ";CM:GOTO 2580
2570 LOCATE 15,15:PRINT "Carga minima permisible = 15 m.c.a.":FOR CIN=1 TO 3:1500:NEXT CIN
2580 DIF=CM-15
2590 RETURN
2600 LOCATE 15,15:INPUT "Nudo ";NUD
2610 LOCATE 17,15:INPUT "Carga (m.c.a.) ";CAR
2620 DIF=CAR-x(NUD)
2630 RETURN
2640 FOR I=1 TO NN
2650 X(I)=x(I)+DIF
2660 NEXT I
2670 RETURN

```

III. MODELO HIDRAULICO

La Ingenieria Hidraulica utiliza los modelos para predecir el efecto de un esquema o diseño propuesto, y de este modo establecer soluciones optimas en el sentido tecnico y economico.

El diseño de cualquier estructura hidraulica puede utilizar tres tipos de criterios:

- La teoria y el razonamiento del fenomeno.
- La experiencia derivada de estructuras similares.
- Las pruebas del diseño propuesto en un modelo.

La experiencia de estructuras similares puede carecer de sentido debido a los aspectos singulares de cada diseño y de las circunstancias de operación a las que estará sometido. Por otra parte, algunos problemas de flujo no establecido, movimiento de sedimentos, y algunos casos de geometría complicada, desafían parcial o totalmente los tratamientos teóricos tradicionales. En estos casos, la experimentación en modelos a escala es frecuentemente el método más eficiente, y a veces el único, para dar solución a estos problemas.

Resulta evidente que el requerimiento básico de cualquier tipo de modelo es que debe reproducir correctamente el comportamiento de la situación modelada. La exactitud de la solución depende de la precisión en la formulación del problema y de la correcta identificación de los principales parámetros que influyen en el fenómeno que se investiga.

Sin embargo, en este caso no se ha modelado ningún prototipo específico, sino que se ha construido una red de geometría arbitraria para estudiar su comportamiento hidráulico; no obstante, se le ha dado el nombre de modelo hidráulico porque de alguna forma se pretende tener cierta semejanza con redes cerradas de agua potable o con redes de agua para industrias.

Por lo anterior, en lo sucesivo se llamara modelo hidráulico, o simplemente modelo, a la instalación utilizada en este trabajo.

3.1 LOCALIZACION DEL MODELO.

El Laboratorio de Hidraulica, de la Direccion General de Construccion y Operacion Hidraulica del D.D.F., se encuentra localizado en las instalaciones de que dispone esta dependencia al sur de la Ciudad de Mexico.

Dentro de este laboratorio, se albergan una serie de modelos fisicos reducidos acorde a las necesidades de experimentacion y espacio disponible, siendo uno de ellos el sistema de tuberias que conforman la red en cuestion.

3.2 DESCRIPCION DEL MODELO.

La red consta de tres circuitos cerrados, y de acuerdo al objetivo y alcance de este estudio, se utilizó tubería de cobre por la gran variedad de diámetros y conexiones comerciales existentes, además de su facilidad de manejo.

Esta red, está alojada dentro de los canales de retorno del laboratorio y por tanto, tiene la misma geometría de ellos (figura 3.1). El abastecimiento de la instalación proviene directamente del tanque elevado que suministra el agua de enfriamiento a las máquinas de la antigua planta de bombeo de Xotepingo.

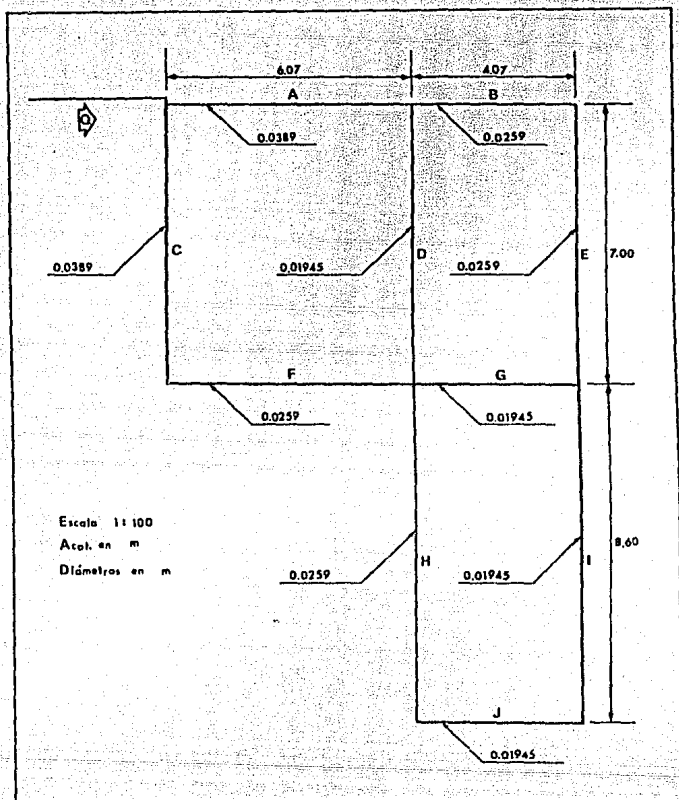


Fig. 3.1.- Geometría de la Red.

3.3 INSTRUMENTACION.

El modelo se instrumentó para medir presiones en los nudos, gastos en los tramos y gastos puntuales de extracción en cada nudo.

Uno de los dispositivos mas simples, y con frecuencia efectivos, para medir la presión en este tipo de instalaciones es el piezometro, construido con un tubo transparente y una escala graduada, con lo cual se mide la carga en cualquier punto de interés. En este caso y debido a la gran presión que proporciona el tanque elevado (45 metros de altura hasta la clave inferior del tanque), se instalaron piezómetros de mercurio en forma de U, cuya longitud de 1.50 m permite medir presiones hasta de 16 m de columna de agua, o 1.8 kg/cm^2 . Las tomas están colocadas 0.15 m antes y despues de cada nudo, con el propósito de determinar las pérdidas por fricción y cuantificar las locales. La manera como se hizo se describe más adelante.

Los piezómetros se colocaron en cinco tableros, dispuestos en lugares convenientes, para la posterior toma de lecturas. Cinco tableros más fueron destinados para las lecturas de los medidores de gasto a través de diafragmas, las cuales se tomaron a través de piezómetros diferenciales de mercurio de 0.80 m de longitud. Todos los piezómetros están provistos de pequeñísimas válvulas que permiten la extracción del aire atrapado, proveniente de la instalación.

El equipo complementario consiste en un recipiente aforador y un cronómetro, con los que se mide volumétricamente el gasto de extracción en los nudos.

3.4 CALIBRACION.

Una vez que la red fue instrumentada, se llevo a cabo la calibracion de los dispositivos de medicion y de los fenomenos que intervienen directamente en el estudio, tales como las perdidas por friccion y locales, para determinar las desviaciones que se pudieran tener con respecto al analisis teorico y, de ser necesario, generar los coeficientes a utilizar de acuerdo a la calibracion.

3.4.1 Perdidas por friccion.

La resistencia al flujo en tubos comerciales ha merecido la atencion de diferentes investigadores que aceptaron el concepto de rugosidad media empleado anteriormente por Nikuradse, ya que la rugosidad en dichos tubos no es homogénea.

Con el fin de comprobar los resultados en las tuberías utilizadas, se obtuvo experimentalmente la perdida por friccion en di-

ferentes diámetros. Para medirla, se instalaron piezómetros simples en cada una de las tuberías a calibrar y se obtuvo directamente la diferencia de presión entre las tomas, colocadas a una distancia L . El gasto que circula por el tubo se afora a la salida del mismo, con la ayuda de un recipiente debidamente graduado y un cronómetro. El procedimiento descrito se llevó a cabo para diferentes gastos, de tal manera que se cubriera un intervalo de No. de Reynolds conveniente.

A partir de la ecuación (2.2), y tomando en cuenta que para flujo permanente en un tubo de diámetro constante, la línea de carga piezométrica es paralela al gradiente hidráulico e inclinada en la dirección del movimiento, se tendrá que

$$V_1 = V_2$$

pero también

$$Z_1 = Z_2$$

y entonces la ecuación (2.2) queda

$$\frac{P_1}{\gamma} = \frac{P_2}{\gamma} + hf_{1-2}$$

por lo que la pérdida de energía por fricción vale

$$hf_{1-2} = H_1 - H_2 \quad (3.1)$$

donde

$$H_1 = \frac{P_1}{\gamma} \quad \text{y} \quad H_2 = \frac{P_2}{\gamma}$$

siendo H_1 y H_2 medidas directamente en los piezómetros simples instalados.

Para la calibración es necesario comparar estos valores medidos con los correspondientes analíticos. Utilizando la fórmula de Darcy-Weisbach:

$$h_{f1-2} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (3.2)$$

donde

- f factor de fricción sin dimensiones.
- g aceleración de la gravedad, en m/s^2 .
- h_{f1-2} pérdida por fricción de 1 a 2, en m.
- D diámetro de la tubería, en m.
- L longitud de 1 a 2, en m.
- V velocidad media, en m/s.

El factor de fricción es función de la rugosidad relativa y del número de Reynolds, esto es

$$f = f(\epsilon/D, Re)$$

siendo

$$Re = \frac{V D}{\nu}$$

donde

- Re número de Reynolds, sin dimensiones.
- ν viscosidad cinemática del fluido, en m^2/s .

El valor de f se obtiene del diagrama universal de Moody (figura 8.3, Ref. 1). Para este caso en particular:

- $\epsilon = 0.0015 \text{ mm}$ (rugosidad absoluta del cobre; tabla 8.1, Ref. 1)
- $\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/s$ (considerando $T=18^\circ C$; figura 1.8, Ref. 1).

La figura 3.2 muestra el resultado de esta calibración, tomando los valores de las tablas 1, 2 y 3 del apéndice A.

3.4.2 Pérdidas locales.

Las tuberías de conducción utilizadas en la práctica están compuestas generalmente por tramos rectos y curvos para ajustarse a la topografía, así como por cambios de geometría y dispositivos de medición y control. Todos estos cambios originan pérdidas de energía distintas a las de fricción, localizadas en el sitio mismo del cambio de geometría o de la alteración del flujo. Estas pérdidas se expresan como una fracción K de la carga de velocidad, inmediatamente aguas abajo del sitio donde se produjo.

A continuación se presentan los dos tipos de pérdida local considerados en este análisis.

a. Pérdida por diafragmas.

Los diafragmas son dispositivos de aforo utilizados en tuberías donde se permite una gran pérdida de energía. Esta característica fue aprovechada en su instalación, ya que con ello es posible simular una mayor longitud en cada tramo. Así, la pérdida provocada por cada diafragma se traduce, para su análisis matemático, en una longitud equivalente de tubería capaz de ocasionar la misma pérdida por fricción.

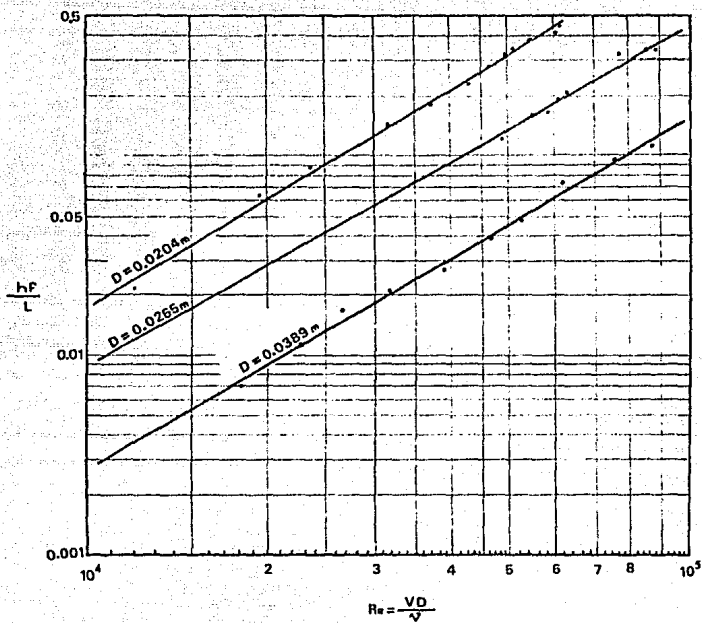


Fig. 3.2.- Pérdida por fricción por metro de longitud para tubería de cobre.

El procedimiento fue muy similar al que se siguió en la determinación de las pérdidas por fricción, sólo que en este caso se tuvo un diafragma instalado entre las tomas piezométricas. Tomando las lecturas de los piezómetros se conoce la pérdida total h_t y, aforando volumetricamente el gasto, se determina la pérdida provocada por la fricción (ya calibrada), con lo que es posible conocer la debida al diafragma por simple diferencia.

Utilizando nuevamente la ecuación (3.1), y para este caso, tenemos que

$$h_{t-2} = h_{f-2} + h_{d-2} \quad (3.3)$$

donde

h_t	pérdida total.
h_f	pérdida por fricción.
h_d	pérdida por diafragma.

de aquí que

$$h_{d-2} = h_{t-2} - h_{f-2}$$

o bien

$$h_{d-2} = H_1 - H_2 - h_{f-2} \quad (3.4)$$

donde $(H_1 - H_2)$ es la diferencia de cargas de presión entre las secciones 1 y 2, y h_{f-2} es la pérdida por fricción calculada con la ecuación (3.2) ya calibrada.

A partir de este momento, las mediciones de presión se hicieron en los piezómetros de mercurio, por lo que a continuación se analizará la manera de interpretar las lecturas tomadas.

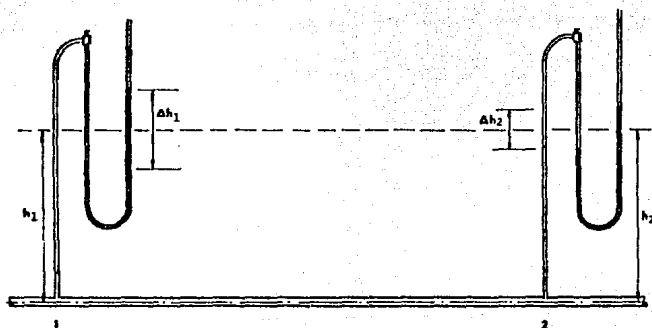


Figura 3.3 Diferencia de presiones entre dos secciones.

Apoyandose en la figura 3.3, la presión en el punto 1 será:

$$P_1 = \gamma h_1 - \gamma \frac{\Delta h_1}{2} + \gamma_{Hg} \Delta h_1 \quad (3.5)$$

y en el punto 2

$$P_2 = \gamma h_2 - \gamma \frac{\Delta h_2}{2} + \gamma_{Hg} \Delta h_2 \quad (3.6)$$

obteniendo la diferencia de presiones ΔP , de la siguiente manera

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \gamma h_1 - \gamma h_2 - \gamma \frac{\Delta h_1}{2} + \gamma \frac{\Delta h_2}{2} + \gamma_{Hg} \Delta h_1 - \gamma_{Hg} \Delta h_2$$

pero

$$h_1 = h_2$$

por lo tanto

$$\Delta P = \gamma \frac{\Delta h_2 - \Delta h_1}{2} + \gamma_{Hg} (\Delta h_1 - \Delta h_2)$$

y la diferencia de cargas de presión vale

$$\frac{\Delta P}{\gamma} = \frac{\Delta h_2 - \Delta h_1}{2} + \frac{\gamma_{Hg}}{\gamma} (\Delta h_1 - \Delta h_2) \quad (3.7)$$

donde

$$\frac{\Delta P}{\gamma}$$

perdida total entre las dos secciones, en m

$$\Delta h_1, \Delta h_2$$

lecturas de los piezómetros, en m.

$$\gamma, \gamma_{Hg}$$

pesos específicos del agua y mercurio respectivamente, en ton/m^3 .

Así, de la ecuación (3.7) se obtiene la pérdida de energía a partir de las mediciones en los piezómetros, misma que aparece en la ecuación (3.4), determinando entonces la pérdida por diafragma. Con ella se calcula el coeficiente k , basándose en la fórmula general de pérdida local:

$$h_d = k \frac{v^2}{2g} \quad (3.8)$$

o bien

$$k = h_d \frac{2g}{v^2}$$

Por otro lado, igualando las ecuaciones (3.2) y (3.8), se tiene que

$$f \frac{L}{D} = K.$$

siendo la longitud equivalente

$$L_e = \frac{KD}{f} \quad (3.9)$$

Ahora bien, el coeficiente K (sin dimensiones) depende del tipo de pérdida que se trate, del número de Reynolds y de la rugosidad del tubo, por lo que fue necesario determinar este coeficiente para varios valores de dicho número.

Es importante señalar que se observó un comportamiento muy similar entre diafragmas con relaciones de A_o/A_i iguales, por lo que se mostrarán los resultados de la calibración en función del número de Reynolds y de la relación A_o/A_i , donde A_o es el área del orificio en el diafragma y A_i el área de la tubería. Estos resultados aparecen en forma gráfica en la figura 3.4, construida a partir de las tablas 4, 5 y 6 del apéndice A.

La relación A_o/A_i de cada uno de los diafragmas es la siguiente:

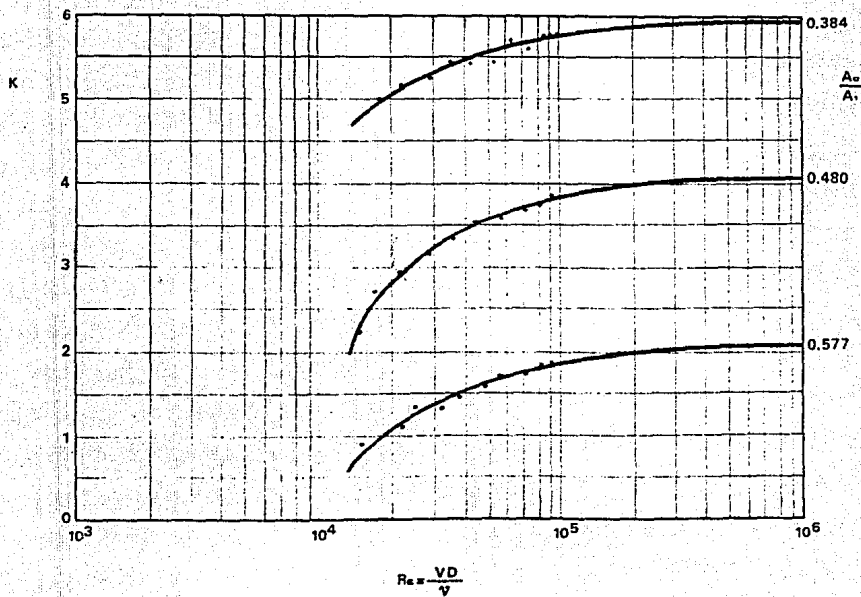


Fig. 3.4.- Coeficiente de pérdida local en diafragmas, siendo A_0 área del estrangulamiento y A_1 , el área del tubo.

Tramo	Diafragma	H_0/A_1
A	D1	0.480
B	D2	0.577
C	D3	0.480
D	D4	0.480
E	D5	0.480
F	D6	0.577
G	D7	0.384
H	D8	0.480
I	D9	0.384
J	D10	0.384
Alimentación	Da	0.480

b. Pérdida por valvulas, cambios de dirección, reducciones y ampliaciones.

Normalmente, en el diseño de un sistema de tuberías, se desprecian las pérdidas provocadas por diversos accesorios y conexiones, debido a que estas son mínimas comparadas con las de fricción. Sin embargo no por esto se han eliminado a priori en el presente caso, sino que se hicieron las pruebas necesarias para comprobarlo. Por ello, se eligieron dos trayectorias de flujo consideradas como las más desfavorables, pasando por varios accesorios y cambios de dirección.

De igual forma, conociendo la pérdida total de energía y el gasto (medidos experimentalmente como ya se ha descrito), se determinaron

las pérdidas por fricción y diafragmas basándose en los resultados de la calibración y, por diferencia, se obtuvo la pérdida provocada por todas las perturbaciones involucradas.

Las dos trayectorias consideradas se indican en la figura 3.5 y son las siguientes:

1. A partir del piezometro N1B del nudo 1, siguió por los tramos C,F,G e I, para terminar en el piezometro N8A del nudo 8. Siguiendo este camino, el flujo pasó por:

- 4 diafragmas,
 - 1 con $A_0/A_1=0.577$
 - 1 con $A_0/A_1=0.480$
 - 2 con $A_0/A_1=0.384$
- 4 cambios de diametro,
 - 1 reduccion de 38 a 25 mm ($1\frac{1}{2}$ a 1")
 - 2 reducciones de 25 a 19 mm (1 a $\frac{3}{4}$ ")
 - 1 ampliacion de 19 a 25 mm ($\frac{3}{4}$ a 1")
- 2 cambios de direccion,
 - 2 de 90° de 25 mm (1")
- 1 valvula,
 - 1 de compuerta totalmente abierta de 19 mm ($\frac{3}{4}$ ")

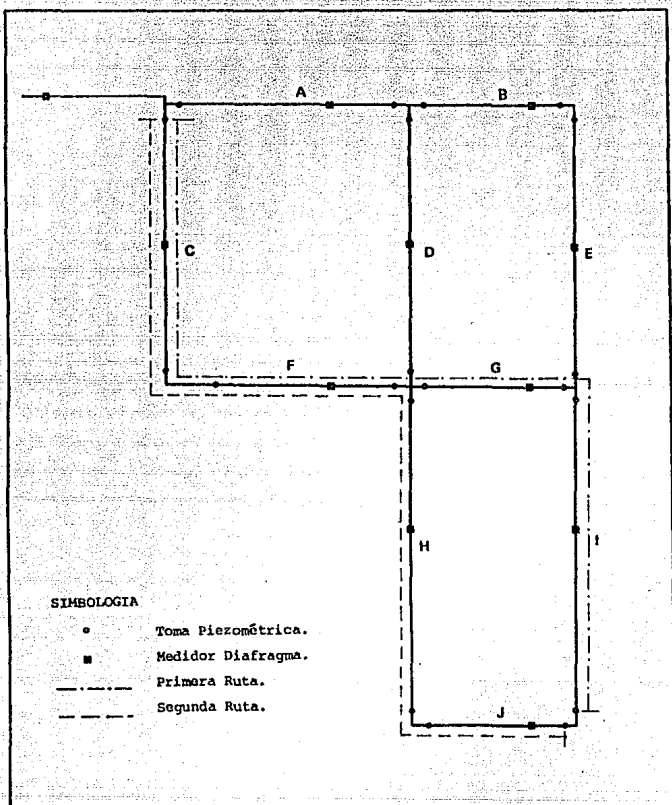


Fig. 3.5.- Trayectorias del flujo para la determinación de pérdidas locales.

2. A partir del mismo N1B, siguió por los tramos C, F, H y J, para llegar finalmente al N8B. El agua pasó por:

- 4 diafragmas,
 - 1 con $A_0/A_1=0.577$
 - 2 con $A_0/A_1=0.480$
 - 1 con $A_0/A_1=0.384$
- 2 cambios de diametro,
 - 1 reducción de 38 a 25 mm ($1\frac{1}{2}$ a 1")
 - 1 reducción de 25 a 19 mm (1 a $\frac{3}{4}$ ")
- 3 cambios de direccion,
 - 3 de 90° de 25 mm (1")
- 1 valvula,
 - 1 de compuerta totalmente abierta de 25 mm (1")

Así, para cada trayectoria, la pérdida local de todos los accesorios por los que pasó el flujo será:

$$h_l = h_t - h_f - h_d$$

donde

- h_l pérdida local por accesorios.
- h_t pérdida total (medida).

hf pérdida por fricción (calculada)¹

hd pérdida por diafragmas (calculada)²

El resultado de los cálculos respectivos, para el primer recorrido, es:

$$ht=8.4118 \text{ m} ; hf=4.8348 \text{ m} ; hd=3.5096 \text{ m}$$

por lo que

$$h1=0.0674 \text{ m}$$

obteniendo el porcentaje de h1 respecto a ht

$$\frac{h1}{ht} \times 100 = 0.8 \%$$

siendo este un indicador de la intrascendencia de estas pérdidas.

Para la segunda trayectoria:

$$ht=6.6377 \text{ m} ; hf=3.5355 \text{ m} ; hd=3.0506 \text{ m}$$

por lo que

$$h1=0.0416 \text{ m}$$

que representa el 0.63 % de las pérdidas totales.

1. Estos valores se calcularán en base a los resultados de la calibración descrita anteriormente.

2. Idem.

Con estos valores, es obvio que las pérdidas locales por accesorios no merecen ser tomadas en cuenta, por lo que en adelante no volverán a mencionarse.

3.4.3 Diafragmas como aforadores.

Estos dispositivos son muy usados para medir caudales, tanto en líquidos como en gases, por la sencillez y economía de su construcción e instalación. Básicamente consiste en una sola placa donde se practica un orificio de área A_o , la cual se inserta dentro de la tubería en la sección deseada. La modificación de las velocidades ocasiona un cambio en la presión, antes y después del diafragma, cuyo valor determina el gasto (a través de las ecuaciones de continuidad y de Bernoulli). Sin embargo, es necesario incluir el coeficiente de gasto C_d , que no solo depende de la geometría del diafragma y de la rugosidad de las paredes, sino también del número de Reynolds, el cual incluye el efecto de la viscosidad del fluido. Es por esto que, a pesar de que los diafragmas utilizados se fabricaron siguiendo estrictamente las especificaciones del Verein Deutscher Ingenieure (VDI), para los que ya existen gráficas en las que aparecen los valores de C_d , estos fueron calibrados y obtenidos sus valores para diferentes gastos.

Como ya se mencionó, planteando las ecuaciones de continuidad y de Bernoulli, se llega a la siguiente fórmula para la cuantificación del gasto:

$$Q = C_d A_o \sqrt{2g \Delta h \left(\frac{\gamma_{Hg}}{\gamma} - 1 \right)} \quad (3.10)$$

donde

C_d	coeficiente de gasto, sin dimensiones.
Q	gasto, en m^3/s .
A_o	área del orificio, en m^2 .
g	aceleración de la gravedad, en m/s^2 .
Δh	deflexión del piezometro diferencial de mercurio, en m.

Cabe hacer notar que el coeficiente C_d está en función de la relación que guardan el área A_o del orificio y el área A_i del tubo, por lo que este coeficiente fue calibrado para las tres relaciones de A_o/A_i que se tienen.

De la ecuación (3.10) se tiene que

$$C_d = \frac{Q}{A_o \sqrt{2g \Delta h \left(\frac{\gamma_{Hg}}{\gamma} - 1 \right)}} \quad (3.11)$$

y a partir de esta ecuación se obtuvieron los valores de C_d para diferentes números de Reynolds. Estos valores se tienen representados gráficamente en la figura 3.6, construida a partir de las tablas 7, 8 y 9 del apéndice A.

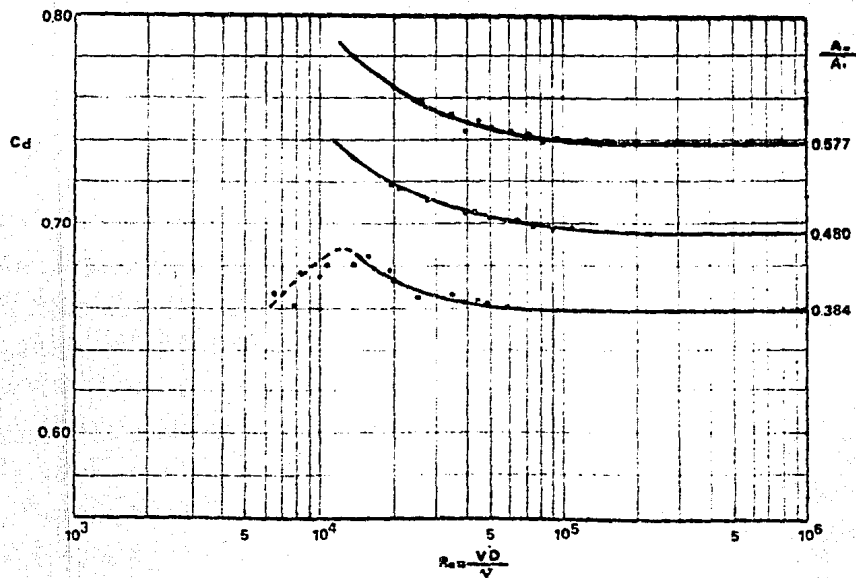


Fig. 3.6.- Coeficiente de gasto en diagramas, siendo A_2 área del estrangulamiento y A_1 área del tubo.

3.5 EXPERIMENTACION.

Para llevar a cabo las mediciones respectivas, se procedio de la siguiente manera:

a. Se estableció un gasto de alimentacion, verificando que las válvulas en los nudos estuvieran completamente abiertas, para evitar presiones excesivas que superaran la capacidad de los piezometros.

b. Se reguló el gasto de salida por nudo de acuerdo a la condicion que se deseaba generar, pero siempre cuidando el exceso de presión.

c. Se extrajo el aire atrapado en la instalación con la ayuda de las válvulas de purga.

d. Se tomaron las lecturas de todos los piezometros en terminos de la diferencia Δh .

e. Se aforo volumetricamente el gasto de extracción en cada uno de los nudos, tomando tiempo y volúmenes tres veces para asegurar la precisión del aforo.

f. Se tomaron nuevamente todas las lecturas piezométricas para comprobar que no existía variación en la presión.

g. Si se quería generar otra condición, se modificaba el gasto de alimentación y/o los de extracción según se requiriera, y continuaba el proceso a partir del inciso d.

El procedimiento descrito se llevó a cabo para cuatro condiciones diferentes, tratando de cubrir el más amplio rango posible. El procesamiento de los datos se hizo en base a la calibración y los resultados se analizarán en su momento.

3.5.1 Resultados experimentales.

1. Primera condición.

En esta etapa simplemente se midieron los gastos y se tomaron las lecturas piezométricas para cada una de las condiciones simuladas. Estos datos se traducen, en base a los resultados de la calibración (principalmente gráficas), a gastos en tramos y nudos, así como presiones o cargas disponibles por nudo.

A continuación se detalla el procedimiento seguido para esta primera condición, resumiendo el resto en pequeñas tablas de cálculo.

a. Características físicas.

- tubería de cobre ($\epsilon = 0.0015 \text{ mm}$)
- agua a 17°C ($\nu = 1.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

b. Características geométricas.

- diámetros y longitudes:

Tirano	Diámetro (m)	Longitud (m)
A	0.0389	6.07
B	0.0259	4.07
C	0.0389	7.00
D	0.01945	7.00
E	0.0259	7.00
F	0.0259	6.07
G	0.01945	4.07
H	0.0259	8.60
I	0.01945	8.60
J	0.01945	4.07

Tabla 1. Diámetros y longitudes reales de la red en ensaye. Estas longitudes se verán incrementadas para el cálculo numérico, por las longitudes equivalentes que correspondan a cada condición.

- diametro de la tubería de alimentación: $D=0.0512$ m.

c. Lectura de datos.

c.1 Cargas de presión en los nudos.

Piezómetro	Δh (cm)
N1A	93.1
N1B	93.3
N2A	75.1
N2B	75.0
N3C	75.0
N3A	59.4
N3B	59.4
N4A	81.8
N4B	79.5
N5A	54.8

Piezómetro	Δh (cm)
N5B	54.6
N5C	54.6
N5D	54.5
N6A	51.2
N6B	51.1
N6C	50.2
N7A	49.0
N7B	48.9
N8A	46.4
N8B	46.1

c.2 Gastos en los tramos.

Tramo	Δh (cm)
A	25.3
B	18.2
C	15.3
D	16.0
E	07.8

Tramo	Δh (cm)
F	25.1
G	05.9
H	04.9
I	04.3
J	04.0

c.3 Gastos de extraccion en los nudos.

Nudo	Tiempo (s)	Nudo	Tiempo (s)
2	18.11	5	24.03
3	24.73	6	21.76
4	26.77	7	47.75
5	24.43	8	36.14

Volumen del recipiente aforador: 18 litros.

Nota: Obsérvese que el nudo 5 tiene dos lecturas, esto debido a que el nudo consta de dos válvulas de extracción.

d. Resultados.

d.1 Cargas de presión en los nudos.

Utilizando la ecuación (3.5), para cualquier nudo y dividiendo entre γ , resultan cargas de presión en metros de columna de agua.

Nudo	Carga (mca)	Nudo	Carga (mca)
1	14.504	5	9.450
2	12.128	6	8.980
3	10.074	7	6.718
4	13.015	8	8.350

d.2 Gastos en los tramos.

Suponiendo inicialmente que C_d no depende de Re , se obtiene su valor de la figura 3.6 y se calcula el gasto de la ecuación (3.10). Con este gasto se determina la velocidad y el número de Reynolds, consultando nuevamente la figura 3.6 para verificar o corregir el valor de C_d .

Tramo	Gasto (l/s)
A	3.139
B	1.513
C	2.443
D	0.632
E	0.785

Tramo	Gasto (l/s)
F	1.771
G	0.295
H	0.622
I	0.253
J	0.245

d.3 Gastos de extracción por nudo.

Nudo	Gasto (l/s)
1	0.000
2	0.994
3	0.726
4	0.672

Nudo	Gasto (l/s)
5	1.466
6	0.827
7	0.577
8	0.496

d.4 Gasto de aportación.

$$Q_{\text{entrada}} = 5.582 \text{ l/s}$$

3.5 Longitudes equivalentes.

Utilizando la ecuación (3.9) y la figura 3.4, el factor de fricción se obtiene del diagrama Universal de Moody (figura B.3 de la Ref.1).

Tramo	Longitud (m)
A	14.19
B	8.41
C	14.50
D	9.95
E	10.76

Tramo	Longitud (m)
F	8.55
G	7.73
H	12.11
I	11.99
J	7.39

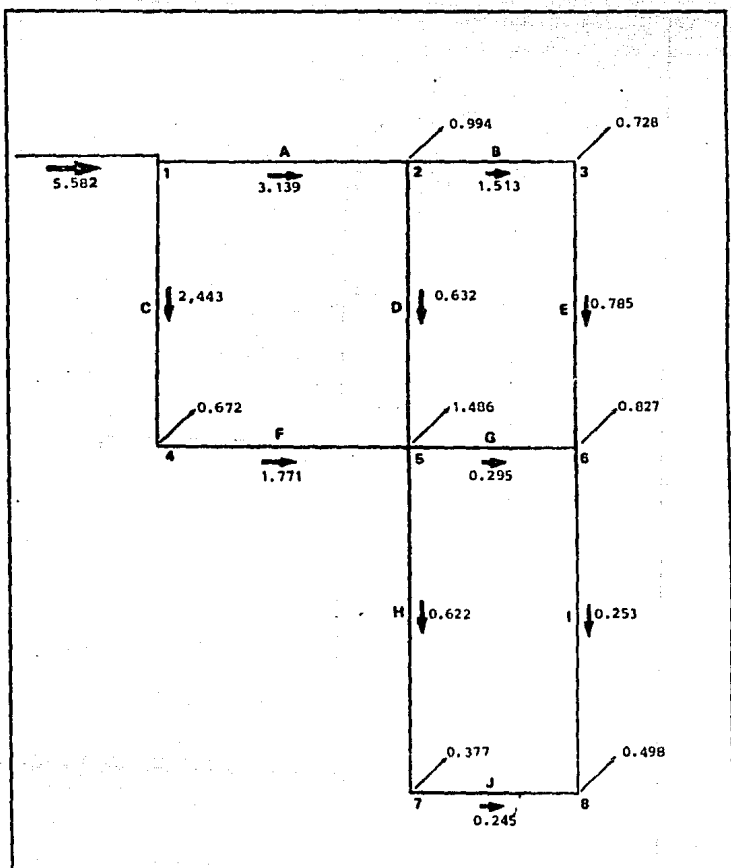


Fig. 3.7.- Distribución y extracción de gastos, en litros por segundo, para la primera condición.

2. Segunda condición.

a. Lectura de datos.

a.1 Cargas de presión en los nudos.

Piezómetro	Δh (cm)
N1A	85.5
N1B	85.4
N2A	74.5
N2B	74.4
N2C	74.5
N3A	62.3
N3B	62.4
N4A	73.2
N4B	72.6
N5A	58.4

Piezómetro	Δh (cm)
N5B	58.4
N5C	58.5
N5D	58.4
N6A	55.1
N6B	55.0
N6C	55.0
N7A	49.6
N7B	49.6
N8A	46.1
N8B	46.2

a.2 Gastos en los tramos.

Tramo	Δh (cm)
A	15.4
B	14.1
C	15.8
D	13.6
E	6.8

Tramo	Δh (cm)
F	12.4
G	5.1
H	7.1
I	6.7
J	4.1

a.3 Gastos de extracción en los nudos.

Nudo	Tiempo (s)
2	33.96
3	30.15
4	14.67
5	45.00

Nudo	Tiempo (s)
5	43.69
6	27.52
7	35.71
8	29.75

a.4 Gasto de aportación.

$$\Delta h = 19.8 \text{ cm}$$

b. Resultados.

b.1 Cargas de presión en los nudos.

Nudo	Carga (mca)
1	13.496
2	12.058
3	10.463
4	11.880

Nudo	Carga (mca)
5	9.948
6	9.510
7	8.795
8	6.755

b.2 Gastos en los tramos.

Tramo	Gasto (l/s)
A	2.447
B	1.333
C	2.482
D	0.584
E	0.736

Tramo	Gasto (l/s)
F	1.255
G	0.274
H	0.765
I	0.336
J	0.246

b.3 Gastos de extracción.

Nudo	Gasto (l/s)
1	0.000
2	0.530
3	0.597
4	1.227

Nudo	Gasto (l/s)
5	0.912
6	0.654
7	0.504
8	0.605

b.4 Gasto de aportación.

$Q_{\text{entrada}} = 4.929 \text{ l/s.}$

b.5 Longitudes equivalentes.

Tramo	Longitud (m)
A	13.61
B	6.27
C	14.60
D	9.82
E	10.81

Tramo	Longitud (m)
F	8.23
G	7.54
H	12.26
I	12.54
J	7.39

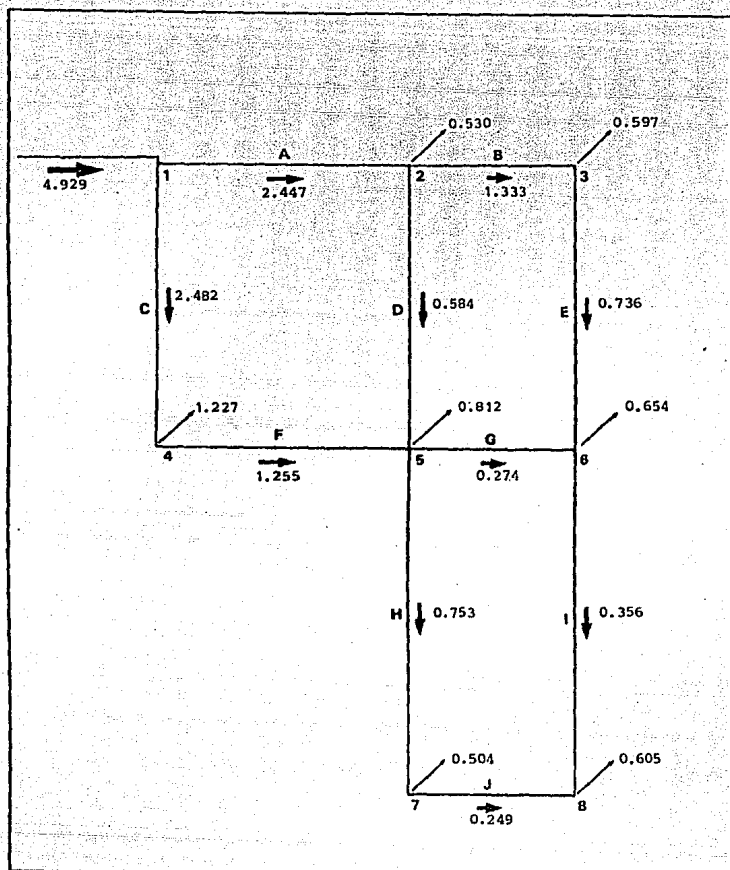


Fig. 3.8.- Distribución y extracción de gastos, en litros por segundo, para la segunda condición.

3. Tercera condicion.

a. Lectura de datos.

a.1 Cargas de presion en los nudos.

Piezometro	Δh (cm)
N1A	76.1
N1B	76.1
N2A	64.8
N2B	64.7
N2C	64.8
N3A	54.0
N3B	53.9
N4A	65.9
N4B	65.6
N5A	47.4

Piezometro	Δh (cm)
N5B	47.4
N5C	47.5
N5D	47.4
N6A	47.2
N6B	47.3
N6C	47.2
N7A	44.5
N7B	44.5
N8A	43.5
N8B	43.6

a.2 Gasto en los tramos.

Tramo	Δh (cm)
A	15.8
B	12.4
C	13.1
D	14.2
E	6.1

Tramo	Δh (cm)
F	16.5
G	0.2
H	2.2
I	3.1
J	1.2

a.3 Gasto de extracción en los nudos.

Nudo	Tiempo (s)	Nudo	Tiempo (s)
2	28.35	5	23.68
3	32.61	6	33.15
4	21.92	7	61.43
5	22.50	8	51.87

a.4 Gasto de aportación.

$$\Delta h = 18.4 \text{ cm}$$

b. Resultados.

b.1 Cargas de presión en los nudos.

Nudo	Carga (mca)	Nudo	Carga (mca)
1	12.265	5	8.513
2	10.787	6	8.492
3	9.370	7	8.132
4	10.933	8	8.025

b.2 Gastos en los tramos.

Tramo	Gasto (l/s)	Tramo	Gasto (l/s)
A	2.483	F	1.444
B	1.251	G	0.061
C	2.065	H	0.423
D	0.597	I	0.217
E	0.699	J	0.150

b.3 Gastos de extracción.

Nudo.	Gasto (l/s)
1	0.000
2	0.635
3	0.552
4	0.821

Nudo	Gasto (l/s)
5	1.557
6	0.543
7	0.293
8	0.347

b.4 Gasto de aportación.

Q entrada = 4.748 l/s

b.5 Longitudes equivalentes.

Tramo	Longitud (m)
A	13.57
B	6.23
C	14.38
D	9.84
E	10.53

Tramo	Longitud (m)
F	8.37
G	8.80
H	11.74
I	11.77
J	6.44

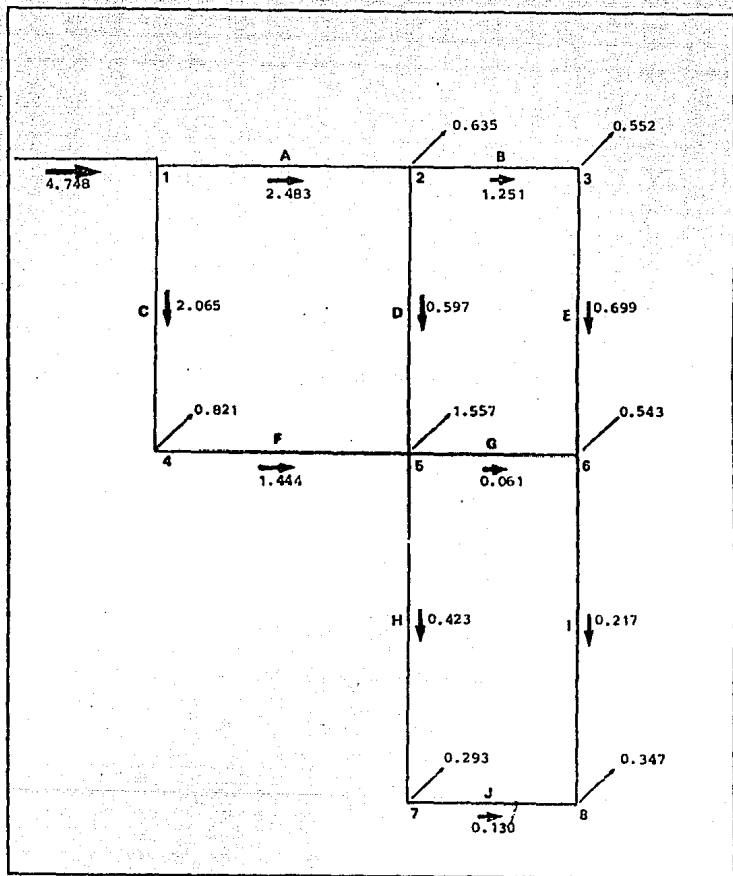


Fig. 3.9.- Distribución y extracción de gastos, en litros por segundo, para la tercera condición.

4. Cuarta condición.

a. Lectura de datos.

a.1 Cargas de presión en los nudos.

Piezómetro	Δh (cm)
N1A	113.5
N1B	113.4
N2A	94.9
N2B	95.0
N2C	94.9
N3A	78.3
N3B	78.3
N4A	49.9
N4B	49.6
N5A	74.1

Piezómetro	Δh (cm)
N5B	74.0
N5C	74.1
N5D	74.1
N6A	69.1
N6B	69.0
N6C	69.1
N7A	60.8
N7B	60.8
N8A	57.2
N8B	57.2

a.2 Gastos en los tramos.

Tramo	Δh (cm)
A	26.3
B	19.6
C	20.0
D	16.5
E	8.7

Tramo	Δh (cm)
F	22.4
G	7.8
H	11.3
I	11.4
J	5.3

a.3 Gasto de extracción en los nudos.

Nudo	Tiempo (s)
2	18.27
3	24.56
4	16.17
5	34.88

Nudo	Tiempo (s)
5	34.62
6	23.65
7	27.11
8	26.28

a.4 Gasto de aportación.

$$\Delta h = 29.2 \text{ cm}$$

b. Resultados.

b.1 Cargas de presión en los nudos.

Nudo	Carga (cma)
1	17.163
2	14.729
3	12.551
4	15.183

Nudo	Carga (cma)
5	12.008
6	11.341
7	10.263
8	9.794

b.2 Gastos en los tramos.

Tramo	Gasto (l/s)
A	3.192
B	1.564
C	2.784
D	0.643
E	0.831

Tramo	Gasto (l/s)
F	1.672
G	0.336
H	0.943
I	0.406
J	0.279

b.3 Gastos de extracción.

Nudo	Gasto (l/s)
1	0.000
2	0.985
3	0.733
4	1.112

Nudo	Gasto (l/s)
5	1.036
6	0.761
7	0.664
8	0.685

b.4 Gasto de aportación.

$$Q_{\text{entrada}} = 5.976 \text{ l/s}$$

b.5 Longitudes equivalentes.

Tramo	Longitud (m)
A	14.19
B	6.41
C	14.80
D	10.01
E	10.77

Tramo	Longitud (m)
F	8.44
G	7.93
H	12.70
I	12.73
J	8.36

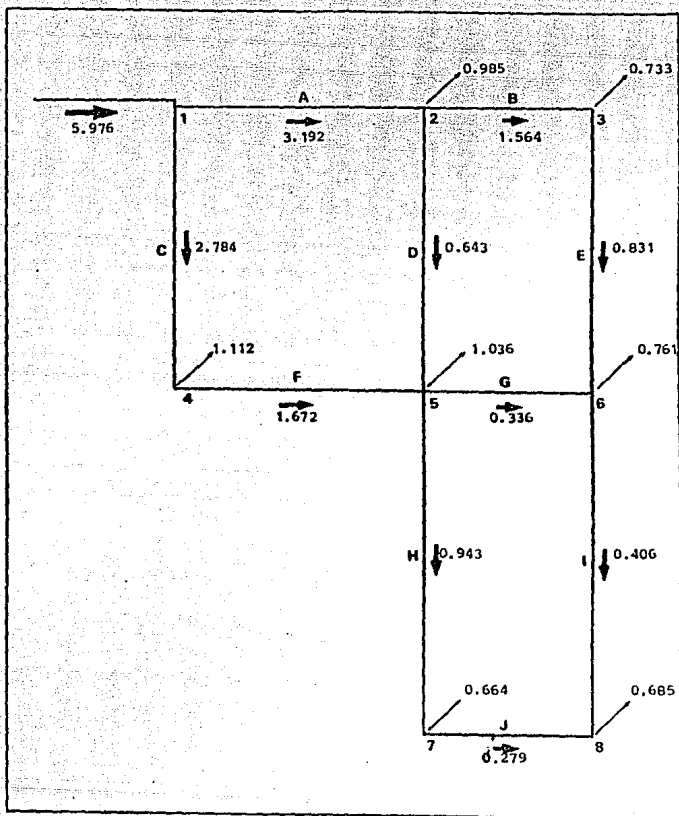


Fig. 3.10.- Distribución y extracción de gastos, en litros por segundo, para la cuarta condición.

IV. COMPARACION DE RESULTADOS

Tomando los resultados arrojados de la experimentation como valores iniciales, se corrió el programa para las cuatro condiciones analizadas, y los resultados se reportan en las tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4.

Analizando cada una de las condiciones medidas, y comparando sus resultados con los obtenidos a partir del método numérico, se tiene que la diferencia entre ambos es tan pequeña que se puede considerar inexistente. El 85 por ciento de los resultados numéricos tuvo una variación menor al 5 por ciento, y un solo resultado el 13 por ciento.

REDES CERRADAS

RESULTADOS

Tramo	N.I.	N.F.	Longitud (m)	Diametro (m)	Velocidad (m/s)	Gasto (l/s)
1	1	2	14.19	0.0389	2.66	3.16
2	2	3	6.41	0.0259	2.90	1.53
3	1	4	14.5	0.0389	2.04	2.43
4	2	5	9.95	0.0194	2.14	0.64
5	3	6	10.78	0.0259	1.52	0.80
6	4	5	8.55	0.0259	3.33	1.75
7	5	6	7.73	0.0194	0.96	0.28
8	5	7	12.11	0.0259	1.17	0.62
9	6	8	11.99	0.0194	0.86	0.26
10	7	8	7.39	0.0194	0.81	0.24

CARGAS EN LOS NUDOS

Nudo	Carga (m)
1	14.50
2	12.09
3	10.01
4	12.97
5	9.40
6	8.90
7	8.61
8	8.25

Tabla 4.1.- Resultados obtenidos a partir del metodo numerico para la primera condicion.

REDES CERRADAS

RESULTADOS

Tramo	N.I.	N.F.	Longitud (m)	Diametro (m)	Velocidad (m/s)	Gasto (l/s)
1	1	2	13.61	0.0389	2.04	2.43
2	2	3	6.27	0.0259	2.53	1.33
3	1	4	14.6	0.0389	2.10	2.50
4	2	5	9.82	0.0194	1.90	0.56
5	3	6	10.81	0.0259	1.40	0.74
6	4	5	8.23	0.0259	2.42	1.27
7	5	6	7.54	0.0194	0.88	0.26
8	5	7	12.26	0.0259	1.45	0.76
9	6	8	12.54	0.0194	1.16	0.35
10	7	8	7.39	0.0194	0.87	0.26

CARGAS EN LOS NUDOS

Nudo	Carga (m)
1	13.50
2	12.05
3	10.45
4	11.86
5	9.92
6	9.49
7	8.75
8	8.34

Tabla 4.2.- Resultados obtenidos a partir del metodo numerico para la segunda condicion.

REDES CERRADAS

RESULTADOS

Tramo	N.I.	N.F.	Longitud (m)	Diametro (m)	Velocidad (m/s)	Gasto (l/s)
1	1	2	13.57	0.0389	2.09	2.48
2	2	3	6.23	0.0259	2.40	1.26
3	1	4	14.38	0.0389	1.90	2.26
4	2	5	9.84	0.0194	1.98	0.59
5	3	6	10.53	0.0259	1.35	0.71
6	4	5	8.37	0.0259	2.74	1.44
7	5	6	8.8	0.0194	0.16	0.05
8	5	7	11.74	0.0259	0.80	0.42
9	6	8	11.77	0.0194	0.73	0.22
10	7	8	6.44	0.0194	0.44	0.13

CARGAS EN LOS NUDOS

Nudo	Carga (m)
1	12.27
2	10.77
3	9.32
4	10.92
5	8.46
6	8.44
7	8.07
8	7.96

Tabla 4.3.- Resultados obtenidos a partir del metodo numerico para la tercera condicion.

REDES CERRADAS

RESULTADOS

Tramo	N.I.	N.F.	Longitud (m)	Diámetro (m)	Velocidad (m/s)	Gasto (l/s)
1	1	2	14.19	0.0389	2.69	3.20
2	2	3	6.41	0.0259	2.98	1.57
3	1	4	14.8	0.0389	2.34	2.78
4	2	5	10.01	0.0194	2.16	0.64
5	3	6	10.77	0.0259	1.59	0.84
6	4	5	8.44	0.0259	3.16	1.67
7	5	6	7.93	0.0194	1.12	0.33
8	5	7	12.7	0.0259	1.78	0.94
9	6	8	12.73	0.0194	1.38	0.41
10	7	8	8.36	0.0194	0.93	0.28

CARGAS EN LOS NUDDS

Nudo	Carga (m)
1	17.16
2	14.69
3	12.49
4	15.17
5	11.96
6	11.28
7	10.21
8	9.70

Tabla 4.4.- Resultados obtenidos a partir del método numérico para la cuarta condición.

Para visualizar mejor lo anterior, se han representado estas variaciones en forma grafica para la primera condicion. Para ello se eligieron tres diferentes rutas a fin de cubrir toda la red. En las figuras 4.1, 4.2 y 4.3, se indica el nivel piezometrico a traves de las tuberias en el sentido del flujo, aclarando que la inclinacion del gradiente no es la misma debido a que en la linea teorica se ha incluido ya la pérdida provocada por el diafragma.

La figura 4.4 muestra la variacion en los valores experimentales y teoricos del gasto en cada tramo, siendo esta una prueba mas de la veracidad de los resultados.

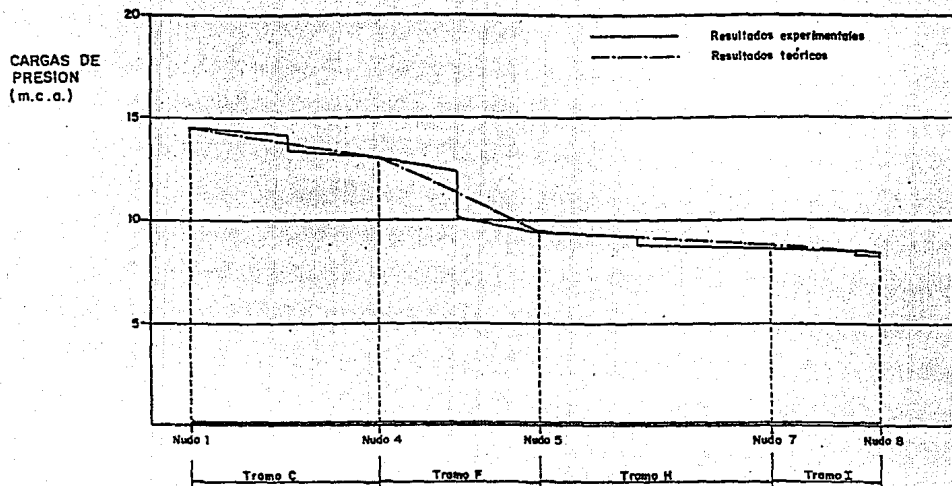


Fig. 4.1 Gradiente piezométrico de la trayectoria número uno para la primera condición.

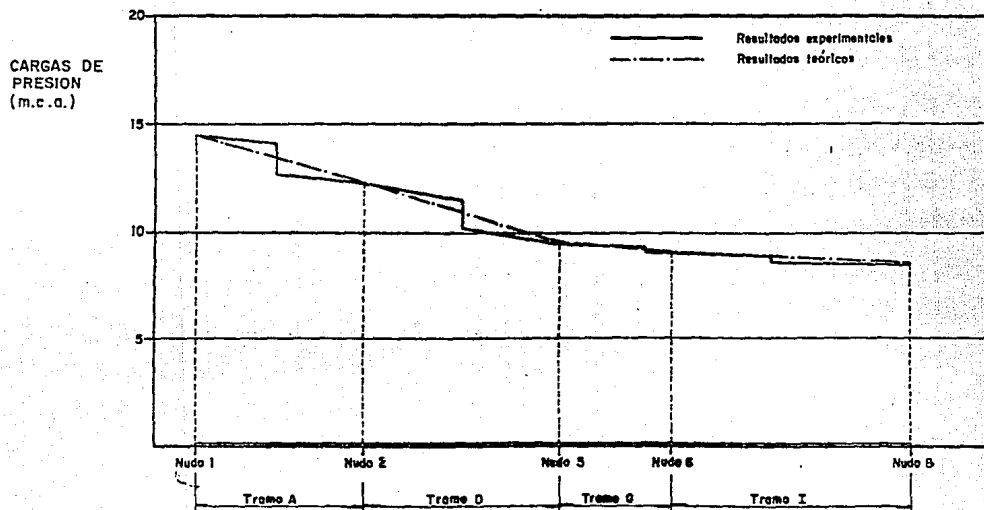


Fig. 4.2 Gradiente piezométrico de la trayectoria número dos para la primera condición.

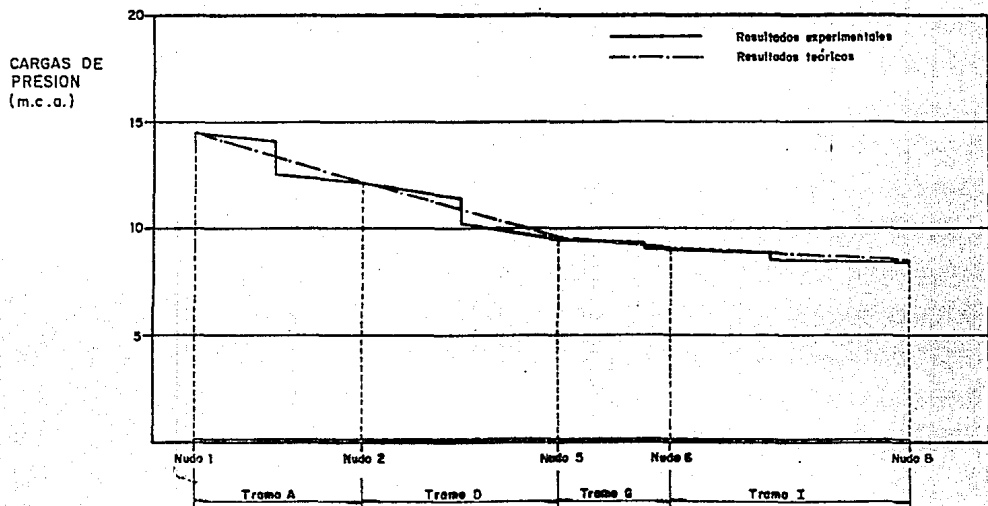


Fig. 4.2 Gradiente piezométrico de la trayectoria número dos para la primera condición.

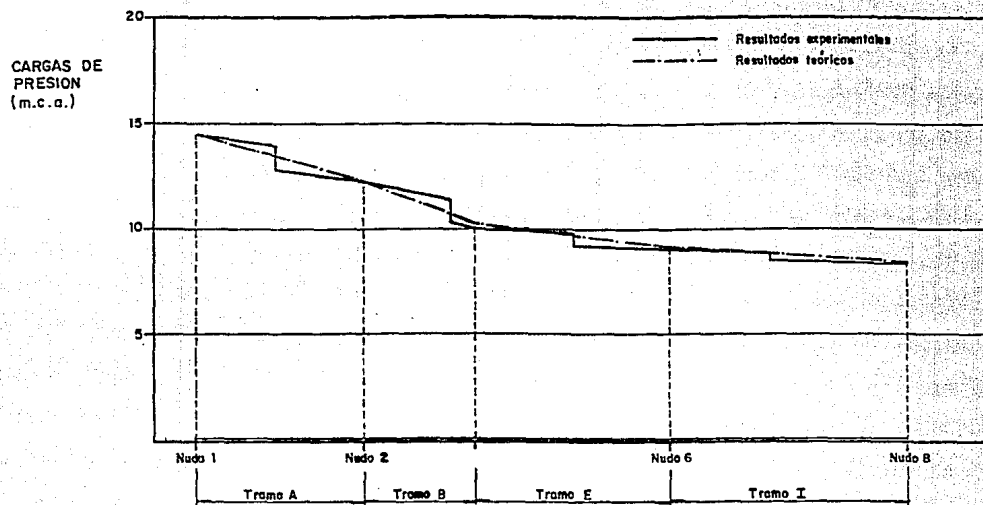


Fig. 4.3 Gradiente piezométrico de la trayectoria número tres para la primera condición.

GASTOS EXPERIMENTALES Y TEORICOS

Primera Condición

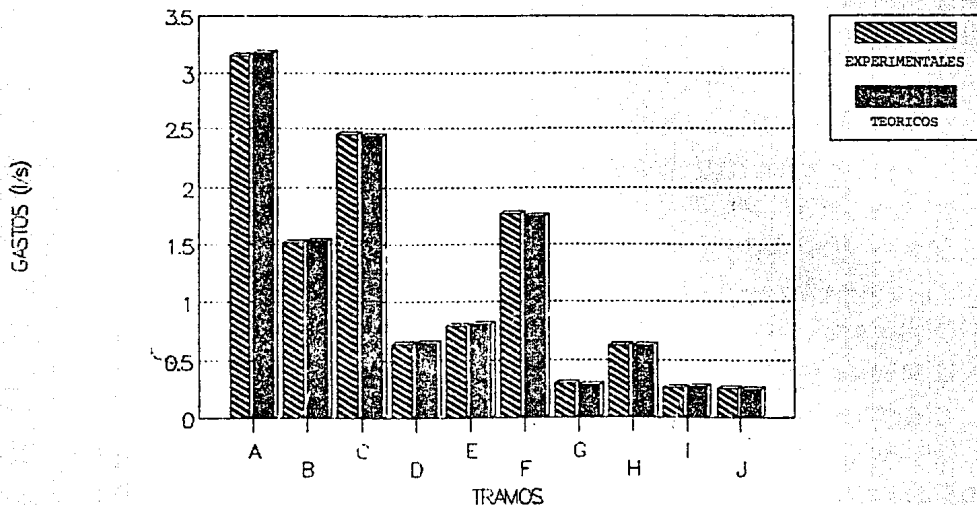


Fig. 4.4.- Variación entre los gastos medidos y calculados para la primera condición.

A pesar de lo anterior, se ha tomado un par de ejemplos de la referencia 1, donde se encuentre la solución por el método de Hardy-Cross. He aquí tales ejemplos:

1. Problema 9.14. La red mostrada en la figura 4.5 tiene la geometría que se indica y a ella llegan o salen los gastos también mostrados. Las constantes α se calculan, a partir de la fórmula de Hutter con un coeficiente $m = 0.20$ (tubos de acero) y para $N = 2$.

Las soluciones del problema, la expuesta en la referencia y la obtenida por el método que aquí se propone, se muestran en la tabla 4.5.

2. Problema propuesto No. 75, capítulo 9. Determinar el gasto en cada tubo del sistema mostrado. Las tuberías son de fierro fundido; el gasto en las derivaciones se expresa en litros por segundo.

En la tabla 4.6 aparecen las soluciones de este problema.

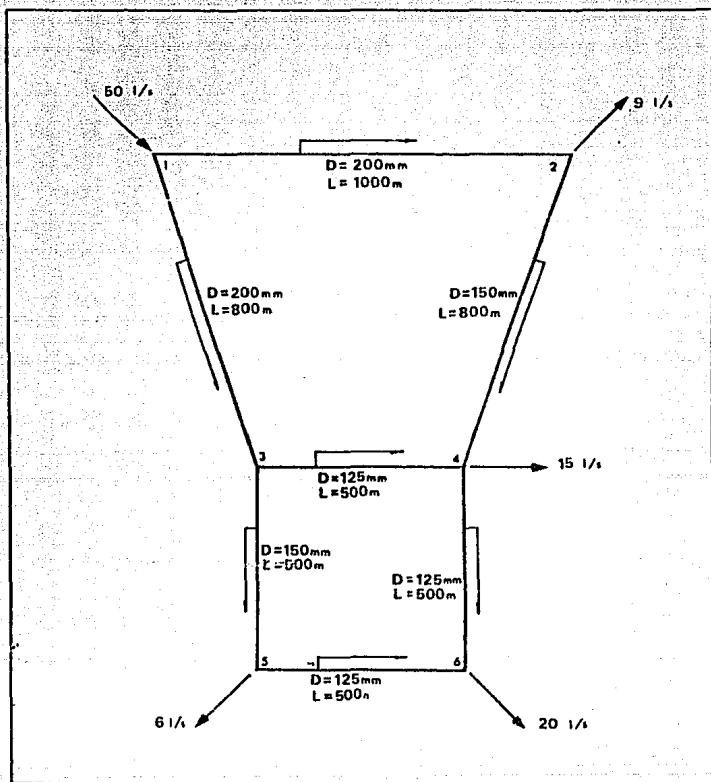


Fig. 4.5.- Red del problema 9.14 de la Ref. 1.

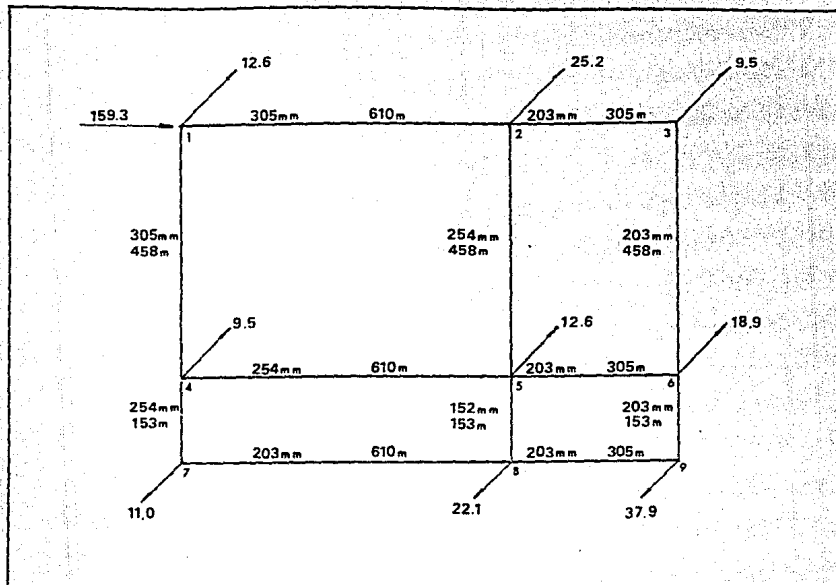


Fig. 4.6.- Red del problema propuesto núm. 75 de la Ref. 1.

TRAMO	GASTO (Ref.) (1/s)	GASTO (M.N.) (1/s)
1-2	23.2	23.19
1-3	26.8	26.81
2-4	14.2	14.19
3-4	10.5	10.33
3-5	16.3	16.46
4-6	9.7	9.52
5-6	10.3	10.46

Tabla 4.5 Soluciones al problema 9.14 de la Ref. 1.

TRAMO	GASTO (Ref.) (1/s)	GASTO (M.N.) (1/s)
1-2	73.05	73.50
2-3	24.25	24.14
1-4	73.62	73.20
2-5	23.60	24.16
3-6	14.78	14.64
4-5	30.66	30.45
5-6	25.48	25.68
4-7	33.45	33.24
5-8	16.22	16.33
6-9	21.33	21.43
7-8	22.45	22.64
8-9	16.57	16.47

Tabla 4.6 Soluciones al problema 75 propuesto de la Ref. 1.

V. CONCLUSIONES

Existen diferentes aspectos que permiten la evaluación preliminar del trabajo desarrollado; dentro de estos, destacan los siguientes:

a. El diseño del modelo físico.

Esto implica la revisión bibliográfica sobre los procedimientos teóricos de los fenómenos, la obtención de información técnica y comercial sobre materiales e instrumentos de medición. A este respecto, el resultado de tal revisión fue negativo, pues no se encontró bibliografía en donde se mencionen modelos físicos de redes de agua; aunque parece extraño que en países donde se tiene una gran experiencia en investigación con modelos físicos, no se hayan hecho estudios para redes cerradas de agua, o que al menos no se reporten en la literatura técnica.

Dentro de las causas, cabe la posibilidad de que los problemas de diseño y revision de redes no hayan ameritado un tratamiento especial porque el crecimiento de las grandes ciudades y, por tanto, la complejidad de los sistemas de tubos haya ido paralelamente al desarrollo de las computadoras.

b. La elaboracion del modelo matematico.

De acuerdo con los planteamientos basicos vistos, los metodos de solucion disponibles parten de considerar valores iniciales de los caudales en cada tramo de la red, los cuales satisfacen la ecuacion de continuidad. Posteriormente, estos valores se van corrigiendo en forma sucesiva aplicando la ecuacion de la energia, con algun criterio predeterminado, hasta que se tienen valores de los caudales que, dentro de una tolerancia dada, satisfacen simultaneamente las condiciones de continuidad y conservacion de energia.

Los primeros metodos para el analisis sistematico de una red, el de Hardy-Cross y el de Cornish, tienen algunos problemas de convergencia cuando la red cuenta con tuberias de grandes diametros por los cuales circulan gastos pequenos; o bien, convergen muy lentamente, aun en el caso de redes relativamente simples, sobre todo cuando la seleccion de los valores iniciales se dispersa en forma importante de la solucion.

El desarrollo de las computadoras digitales permitio el uso de tecnicas de análisis más sofisticadas y con ello la evolucion de un gran número de modelos. En términos generales, estos se basan en el método de Newton-Raphson, con sus distintas variantes para resolver el sistema de ecuaciones. Dado que este método ajusta simultáneamente los caudales en todos los tramos de la red, su convergencia es mucho más rápida que la de Cross y Cornish; sin embargo, aquí también se requiere asignar con cuidado los valores iniciales, pues de otro modo, se llegan a tener problemas de inestabilidad numérica que impiden llegar a una solución.

El método utilizado para este trabajo, parte de encontrar una relación entre los valores de las variables en dos iteraciones sucesivas. Esto se logra desarrollando en serie de Taylor las ecuaciones de pérdida de carga en los distintos tramos de la red y despreciando los términos de orden superior al segundo. Así, si se parte de valores conocidos en la iteración k , los valores de la iteración $k+1$ pueden obtenerse a través del sistema de ecuaciones lineales, con lo que se asegura la convergencia y se acelera el proceso en gran medida. Actualmente, este modelo se encuentra funcionando en la computadora de la D.G.C.O.H. (Data General Eclipse MN 8000, lenguaje Fortran 77).

Por todo lo anterior, y considerando los resultados obtenidos de

la experimentación directa, cabe hacerse el siguiente cuestionamiento:

- ¿Será necesario seguir utilizando métodos de análisis poco prácticos?
- ¿Debe continuar el método de Hardy-Cross, siendo el principal y único en los cursos a nivel licenciatura?
- ¿No es posible proporcionar a las nuevas generaciones los nuevos procedimientos e ir de la mano con el desarrollo tecnológico?

Con base a la comparación hecha en el capítulo IV entre valores obtenidos a partir del método numérico y los correspondientes experimentales, e inclusive, entre este método y el de Cross, se puede asegurar la nobleza del mismo y recomendarlo ampliamente para la resolución de cualquier red cerrada con plena confianza. Sin embargo, la experiencia y criterio del Ingeniero no pueden ser sustituidos por método o programa alguno, quedando bajo la responsabilidad del usuario el empleo de este.

Sea pues esta, una propuesta formal para que el presente trabajo sea considerado por quienes tengan en sus manos los programas de estudio respectivos; se intente un cambio sobre procedimientos un tanto obsoletos, y se proporcione a los estudiantes las nuevas técnicas de análisis.

APENDICE

t	H ₁	H ₂	hf _m	Q	V	f _m	Re	f _c	hf _c	hf _m
(s)	(cm)	(cm)	(cm)	(l/s)	(m/s)	$\times 10^{-2}$	$\times 10^4$	$\times 10^{-2}$	(cm)	L
51.3	218.8	57.9	160.9	0.9942	3.0416	1.96	6.20	2.00	164.29	0.453
52.46	203.9	51.1	152.8	0.9722	2.9743	1.95	6.07	2.01	157.89	0.430
58.10	173.8	40.2	133.6	0.8778	2.6856	2.09	5.48	2.06	131.93	0.376
62.80	156.1	34.6	121.5	0.8121	2.4846	2.22	5.07	2.10	115.11	0.342
63.84	146.2	31.5	114.7	0.7989	2.4441	2.16	4.99	2.11	111.92	0.323
68.92	124.4	24.3	100.1	0.7400	2.2640	2.20	4.62	2.15	97.85	0.282
74.44	101.4	16.4	85.0	0.6851	2.0961	2.18	4.28	2.16	84.27	0.239
86.16	73.7	8.3	65.4	0.5919	1.8110	2.25	3.69	2.23	64.94	0.184
101.89	57.8	7.7	50.1	0.5005	1.5314	2.41	3.12	2.29	47.69	0.141
133.67	35.3	4.0	31.3	0.3815	1.1673	2.59	2.38	2.50	30.25	0.088
161.99	24.9	2.3	22.6	0.3148	0.9632	2.74	1.96	2.59	21.34	0.064
268.10	9.4	1.6	7.8	0.1902	0.5820	2.59	1.19	2.78	8.36	0.022

Diámetro de la tubería : $d=0.0204$ m.

Longitud considerada : $L=3.554$ m.

Volumen del recipiente aforador : $V=0.051$ m³.

Rugosidad absoluta : $\epsilon=0.0015$ mm.

Tabla 1. Calibración de pérdidas por fricción.

t (s)	H ₁ (cm)	H ₂ (cm)	hf _m (cm)	Q (l / s)	V (m ³ / s)	f _m $\times 10^{-2}$	Re $\times 10^4$	f _c $\times 10^{-2}$	hf _c (cm)	hf _m L
29.06	201.3	63.4	137.9	1.7550	3.1819	1.77	8.43	1.85	143.74	0.346
29.60	203.1	65.1	138.0	1.7230	3.1239	1.84	8.28	1.86	139.29	0.346
31.82	190.3	58.5	131.8	1.6028	2.9060	2.03	7.70	1.92	124.42	0.330
38.69	105.7	20.7	85.0	1.3182	2.3900	1.94	6.33	1.98	86.79	0.213
39.70	94.8	16.5	78.3	1.2846	2.3292	1.88	6.17	1.99	82.85	0.196
41.81	81.2	10.3	70.9	1.2198	2.2116	1.89	5.86	2.01	75.45	0.178
43.80	72.1	5.8	66.3	1.1644	2.1111	1.94	5.59	2.03	69.43	0.166
49.76	56.1	4.0	52.1	1.0249	1.8583	1.97	4.92	2.10	55.65	0.131
185.25	224.3	218.4	5.9	0.2753	0.4991	3.09	1.32	2.90	5.54	0.015
192.74	220.3	214.9	5.4	0.2646	0.4798	3.06	1.27	2.92	5.16	0.014

Diámetro de la tubería : $d=0.0265$ m.

Longitud considerada : $L=3.99$ m.

Volumen del recipiente aforador : $V=0.051$ m³.

Rugosidad absoluta : $\epsilon=0.0015$ mm.

Tabla 2. Calibración de pérdidas por fricción.

t (s)	H_1 (cm)	H_2 (cm)	h_{f_m} (cm)	Q (l / s)	V (m / s)	f_m $\times 10^{-2}$	Re $\times 10^3$	f_c $\times 10^{-2}$	h_{f_c} (cm)	h_{f_m} - L
19.98	221.3	174.3	47.6	2.5526	2.1478	1.92	8.35	1.87	45.77	0.116
22.36	205.6	167.3	38.3	2.2809	1.9192	1.96	7.47	1.91	37.33	0.095
27.25	181.1	154.6	26.5	1.8716	1.5748	2.01	6.13	1.98	26.06	0.065
31.63	165.6	146.3	19.3	1.6924	1.3567	1.98	5.28	2.06	20.12	0.048
35.87	141.2	125.5	15.7	1.4218	1.1963	2.07	4.65	2.13	16.18	0.039
42.66	131.8	120.9	10.9	1.1955	1.0059	2.03	3.91	2.20	11.81	0.027
53.18	118.5	109.8	8.7	0.9590	0.8069	2.52	3.14	2.34	8.09	0.021
62.61	105.3	98.5	6.8	0.8146	0.6854	2.73	2.67	2.43	6.06	0.017
75.36	98.3	93.8	4.5	0.6768	0.5694	2.62	2.22	2.55	4.39	0.011
93.09	83.7	80.9	2.8	0.5479	0.4610	2.48	1.79	2.64	2.98	0.007

Diámetro de la tubería : $d=0.0389$ m.

Longitud considerada : $L= 4.05$ m.

Volumen del recipiente aforador : $V=0.051$ m³.

Rugosidad absoluta : $\epsilon=0.0015$ mm.

Tabla 3. Calibración de pérdidas por fricción.

t (s)	Δh (cm)		ht (cm)	Q (l / s)	V (m / s)	Re $\times 10^4$	f $\times 10^{-3}$	hf (cm)	hd (cm)	K —
	N1B	N4A								
5.82	83.4	65.3	236.5	3.0952	2.6044	9.21	1.82	105.5	131.0	3.79
6.62	73.7	59.7	183.5	2.7188	2.2877	8.09	1.88	84.1	99.5	3.73
7.39	63.8	52.5	148.3	2.4365	2.0501	7.25	1.93	69.3	79.0	3.69
9.38	54.7	47.6	93.3	1.9190	1.6147	5.71	2.04	45.4	47.8	3.60
11.69	46.0	41.4	60.6	1.5392	1.2951	4.58	2.13	30.5	30.1	3.52
14.80	38.7	35.8	38.0	1.2166	1.0237	3.62	2.26	20.2	17.8	3.33
18.28	31.8	29.9	25.0	0.9847	0.8285	2.93	2.37	13.9	11.1	3.16
23.91	16.3	15.2	14.7	0.7528	0.6334	2.24	2.53	8.7	6.0	2.94
31.14	10.0	9.3	8.7	0.5780	0.4864	1.72	2.70	5.5	3.3	2.72
34.55	3.5	3.0	6.7	0.5209	0.4383	1.55	2.76	4.5	2.2	2.23

Diámetro de la tubería : $d = 0.0389 \text{ m.}$

Longitud considerada : $L = 6.52 \text{ m.}$

Volumen del recipiente aforador : $V = 0.018 \text{ m}^3.$

Rugosidad absoluta : $\epsilon = 0.0015 \text{ mm.}$

Tabla 4. Coeficiente de pérdida en diafragmas con relación

$$A_2/A_1 = 0.480 .$$

t (s)	Δh (cm)		ht (cm)	Q (l / s)	V (m / s)	Re $\times 10^4$	f $\times 10^{-3}$	hf (cm)	hd (cm)	K —
	N4B	N5B								
8.76	81.0	52.7	370.1	2.0541	3.8988	9.18	1.84	230.6	139.5	1.80
9.76	71.3	48.3	301.0	1.8438	3.4996	8.24	1.88	189.9	111.1	1.78
11.31	58.8	41.6	224.9	1.5909	3.0197	7.11	1.94	145.9	79.0	1.70
14.34	47.4	36.4	143.6	1.2553	2.3826	5.61	2.03	95.9	48.6	1.68
16.69	38.0	29.8	106.9	1.0785	2.0471	4.82	2.11	72.9	34.0	1.59
21.33	28.6	23.5	66.8	0.8481	1.6097	3.79	2.24	47.9	18.9	1.43
25.14	19.8	16.2	47.4	0.7160	1.3591	3.20	2.34	35.6	11.8	1.25
32.44	14.1	11.8	29.9	0.5549	1.0533	2.48	2.46	22.5	7.4	1.31
36.40	10.5	8.7	23.2	0.4945	0.9386	2.21	2.52	18.3	4.9	1.09
50.59	5.4	4.4	12.5	0.3558	0.6753	1.59	2.74	2.2	2.2	0.93

Díámetro de la tubería : $d=0.0259$ m.

Longitud considerada : $L=4.19$ m.

Volumen del recipiente aforador : $V=0.018$ m³.

Rugosidad absoluta : $\epsilon=0.0015$ mm.

Tabla 5. Coeficiente de pérdida en diafragmas con relación

$$A_0/A_1 = 0.577 .$$

t (s)	Δh (cm)		ht (cm)	Q (l / s)	V (m ³ / s)	Re $\times 10^4$	f $\times 10^{-2}$	hf (cm)	hd (cm)	K —
	H6C	H8A								
11.02	118.2	10.0	1417.6	1.6333	5.4972	9.72	1.81	528.9	888.7	5.77
11.84	102.4	8.2	1233.8	1.5207	5.1183	9.05	1.84	466.1	767.7	5.75
12.38	93.5	7.3	1129.2	1.4535	4.8920	8.65	1.87	432.7	696.5	5.71
14.24	72.6	6.75	862.3	1.2636	4.2530	7.52	1.91	334.1	528.2	5.73
15.46	61.8	6.2	728.1	1.1645	3.9193	6.93	1.94	288.2	440.0	5.62
18.60	44.9	5.5	516.1	0.9679	3.2576	5.76	2.03	208.3	307.8	5.69
20.44	36.8	4.7	421.0	0.8805	2.9635	5.24	2.09	177.5	243.5	5.44
25.38	25.4	4.1	278.6	0.7091	2.3866	4.22	2.18	120.1	158.5	5.46
30.52	18.6	3.6	196.3	0.5898	1.9851	3.51	2.28	86.9	109.5	5.45
36.19	13.9	3.2	139.8	0.4974	1.6740	2.96	2.37	64.2	75.6	5.29

Diámetro de la tubería : $d=0.0195 \text{ m.}$

Longitud considerada : $L= 3.69 \text{ m.}$

Volumen del recipiente aforador : $V=0.018 \text{ m}^3.$

Rugosidad absoluta : $\epsilon=0.0015 \text{ mm.}$

Tabla 6. Coeficiente de pérdida en diafragmas con relación
 $A_0/A_1 = 0.384 .$

t (s)	Δh (cm)	Q (l/s)	V (m/s)	Re $\times 10^4$	Cd —
5.66	26.0	3.1780	2.6740	10.40	0.696
6.56	19.4	2.7434	2.3083	8.98	0.695
8.12	12.6	2.2181	1.8663	7.26	0.697
9.17	9.8	1.9625	1.6513	6.42	0.700
10.21	7.9	1.7621	1.4827	5.77	0.700
12.13	5.6	1.4837	1.2484	4.86	0.700
13.46	4.5	1.3377	1.1256	4.38	0.704
14.85	3.7	1.2121	1.0199	3.97	0.703
17.33	2.7	1.0390	0.8742	3.40	0.706
21.12	1.8	0.8522	0.7171	2.79	0.709

Diámetro de la tubería : $d = 0.0389 \text{ m}$.

Volumen del recipiente aforador : $V = 0.018 \text{ m}^3$.

Tabla 7. Coeficiente de gasto en diafragmas con relación
 $A_0/A_1 = 0.480$.

t (s)	Δh (cm)	Q (l/s)	V (m/s)	Re $\times 10^4$	Cd
8.06	40.1	2.2331	4.2386	10.98	0.738
9.48	28.9	1.8997	3.6058	9.34	0.740
10.71	22.7	1.6804	3.1895	8.26	0.738
12.41	16.8	1.4500	2.7522	7.13	0.741
14.49	12.2	1.2419	2.3572	6.11	0.744
17.53	8.3	1.0271	1.9495	5.05	0.746
19.62	6.6	0.9174	1.7413	4.51	0.748
22.60	5.0	0.7966	1.5120	3.92	0.746
25.06	4.0	0.7183	1.3634	3.53	0.752
26.81	3.5	0.6713	1.2742	3.30	0.751

Diámetro de la tubería : $d=0.0259$ m.

Volumen del recipiente aforador : $V=0.018$ m³.

Tabla 8. Coeficiente de gasto en diafragmas con relación
 $A_0/A_1 = 0.577$.

t (s)	Δh (cm)	Q (l / s)	V (m / s)	Re $\times 10^4$	Cd —
20.06	57.5	0.8973	3.0200	5.87	0.660
24.20	39.4	0.7437	2.5030	4.87	0.661
26.38	32.9	0.6822	2.2961	4.47	0.663
30.69	24.4	0.5864	1.9736	3.84	0.662
33.47	20.3	0.5377	1.8097	3.52	0.666
46.13	10.4	0.3902	1.3133	2.55	0.675
58.04	6.6	0.3101	1.0437	2.03	0.673
61.56	5.8	0.2924	0.9841	1.91	0.677
70.94	4.3	0.2537	0.8539	1.66	0.682
83.68	3.1	0.2151	0.7240	1.41	0.681

Diámetro de la tubería : $d=0.0195$ m.

Volumen del recipiente aforador : $V=0.018$ m³.

Tabla 9. Coeficiente de gasto en diafragmas con relación
 $A_0/A_1 = 0.384$.

REFERENCIAS

1. Sotelo A., Gilberto.
Hidráulica General. Volumen I. Fundamentos.
Editorial Limusa, 1980.
2. Sotelo A., Gilberto.
Red primaria del Distrito Federal. Factibilidad Técnica de
un Modelo Hidráulico. Ingeniería, Desarrollo y Sistemas
para la D.G.C.O.H., D.D.F., 1984.
3. Mataix, Claudio.
Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas.
Editorial Karla, 1977.
4. Enrique Aguilar y Asociados, S.C.
Evaluación y Diseño de la Red Primaria de Agua Potable del
Distrito Federal. IDESA para la D.G.C.O.H., D.D.F., 1984.

5. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica.
D.D.F. Manual de Hidráulica Urbana.
Tomos I, II y III, septiembre de 1982.
6. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica.
D.D.F. Instructivo de uso del modelo estático.
Documento sin fecha.
7. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica.
D.D.F. Modelo Estático, manual del usuario, abril de 1984.
8. Sánchez B., J.L.
Doce Algoritmos para resolver problemas de Hidráulica.
Instituto de Ingeniería, No. 412, agosto de 1982.