

RESOLUCION DE REDES CERRADAS COMPLEJAS DE CAÑERIAS

Baldomero Sáez Rámila (1)

Claudio Salvatierra Pacheco (2)

RESUMEN

El trabajo presenta una extensión al método Hardy-Cross de análisis de redes cerradas de cañerías, lo que permite abordar redes cerradas complejas con elementos tales como alimentación desde varios estanques e introducción de bombas y singularidades en cualquier punto de la red. Adicionalmente, se describe un programa computacional de resolución, escrito en PASCAL, el cual se ilustra mediante un ejemplo de una red de tamaño medio, que contiene treinta y nueve cañerías, ventiseis nodos, catorce mallas, tres estanques, tres singularidades y tres bombas.

(1) Profesor, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.

(2) Alumno, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.

1.- Introducción

Existen diferentes métodos, siendo los más conocidos los de Hardy-Cross (Cross, 1936) ; de Newton-Raphson (Jeppson, 1976) y la teoría lineal (Wood y Charles, 1972), para resolver redes cerradas que contengan alimentación desde sólo un estanque y que los únicos cambios en la energía que transporta el fluido se deban a la fricción. Sin embargo, estos métodos pueden extenderse fácilmente para solucionar redes con alimentación desde varios estanques y con cambios en la energía del fluido debido ya sea a la fricción, a las singularidades o a bombas.

La forma de resolver una red compleja, empleando el método de Hardy-Cross, se basa en transformar la red real alimentada desde varios estanques en una red ficticia equivalente, que contenga un sólo punto de alimentación, en redefinir la pérdida de energía por unidad de peso en cada cañería y en determinar el verdadero gasto de corrección a aplicar en cada circuito cerrado perteneciente a la red.

El modelo de solución propuesto se ha implementado computacionalmente en lenguaje PASCAL, con objeto de compararlo con un programa similar (Varas y Santa María, 1972) escrito en FORTRAN y basado en el método de Newton-Raphson. El nuevo programa tiene incorporado un procedimiento que asigna una distribución inicial de caudales, con lo cual se elimina la necesidad de que el usuario introduzca, como dato de entrada, esa distribución inicial. Tanto el modelo teórico como su implementación computacional se han probado con numerosas redes, estando correctos los resultados en todas esas situaciones.

2.- Fundamentos Teóricos.

2.1. Procedimiento de Resolución

Las etapas que a continuación se describen brevemente, constituyen el método propuesto para resolver redes complejas de cañerías, a partir del método de Hardy-Cross ampliado :

i) Formación de la Red Equivalente.

Se transforma la red real, que posee varios estanques, en otra equivalente ficticia, que tenga un único punto de alimentación. Este estanque que permanece, en la red equivalente, es aquel que tiene el mayor nivel energético y por él se hace ingresar todo el gasto que alimenta a la red. El resto de los estanques se elimina trazando "pseudo-cañerías", las que unen cada estanque eliminado con el que permanece. El gasto que ingresa o sale de los estanques eliminados corresponde al que circulará por la pseudo-cañería correspondiente. La Figura 1 ilustra la transformación de una red alimentada por tres estanques en la red equivalente de estanque único.

ii) Determinación de Circuitos.

Se divide la red equivalente en un número tal de circuitos cerrados que asegure que cada cañería y pseudo-cañería esté incluida al menos en un circuito. Los circuitos así determinados se dividirán en mallas (circuitos que sólo contienen cañerías) y "pseudo-mallas" (circuitos que contienen al menos una pseudo-cañería).

iii) Sentido de los Circuitos.

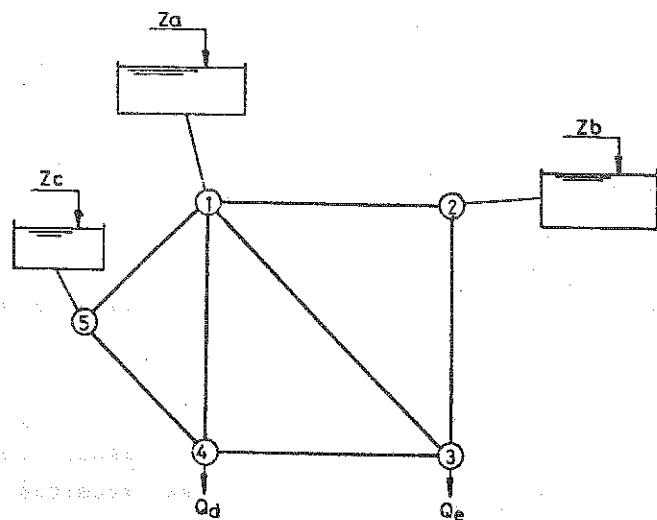
Arbitrariamente, se eligen como positivos los siguientes sentidos:

- Mallas : el de los punteros del reloj
- Pseudo-mallas : el que resulta de recorrer la pseudo-malla, desde el estanque de mayor nivel energético al otro estanque, por la pseudo-cañería.

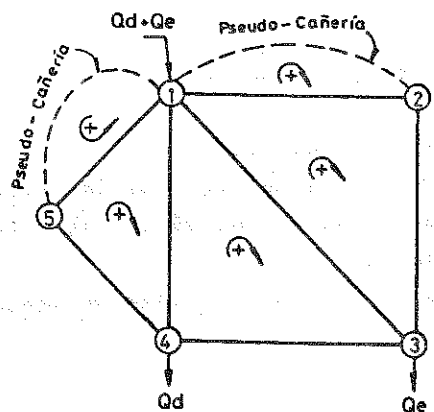
La Figura 1 muestra el sentido positivo de las mallas y pseudo-mallas.

iv) Distribución Inicial de Gastos.

Se asume una distribución inicial de gastos, Q_{ij} , para todas las cañerías y pseudo-cañerías de la red equivalente, de modo de satisfacer la ecuación de continuidad de gasto en todos los nodos.



(a) Red original ($Z_a > Z_b$; $Z_a > Z_c$)



(b) Red equivalente

Figura N°1 TRANSFORMACION DE UNA RED CON TRES ESTANQUES EN SU EQUIVALENTE.

v) Signo de los Gastos.

Los gastos que circulan por las cañerías y pseudo-cañerías serán positivos si tienen el mismo sentido que la malla o pseudo-malla a la cual pertenecen; si tienen sentido inverso, el gasto será negativo.

vi) Pérdida de Energía para las Cañerías y Pseudo-cañerías.

- Cañerías :

La pérdida de energía, por unidad de peso de fluido, en la cañería que une los nodos i, j , corresponde a la suma de las pérdidas por fricción y por singularidades menos la energía adicionada por la bomba, es decir :

$$(\Delta h)_{ij} = (\Delta h_f)_{ij} + (\Delta h_s)_{ij} - (\Delta h_b)_{ij} \quad (1)$$

donde,

$(\Delta h)_{ij}$ = pérdida de energía, por unidad de peso de fluido, en la cañería que une los nodos i, j , metros columna de fluido (m.c.f.)

$(\Delta h_f)_{ij}$ = pérdida de energía debido a la fricción, por unidad de peso de fluido, en la cañería que une los nodos i, j , m.c.f.

$(\Delta h_s)_{ij}$ = pérdida de energía debido a las singularidades, por unidad de peso de fluido, en la cañería que une los nodos i, j , m.c.f.

$(\Delta h_b)_{ij}$ = energía adicionada, por unidad de peso de fluido, por la bomba ubicada en la cañería que une los nodos i, j , m.c.f.

Las pérdidas de energía por fricción y por singularidades y la energía adicionada por la bomba pueden expresarse como :

$$(\Delta h_f)_{ij} = r_{ij} \cdot Q_{ij}^m \quad (2)$$

$$(\Delta h_s)_{ij} = k_{ij} \cdot Q_{ij}^2 \quad (3)$$

$$(\Delta h_b)_{ij} = (A_0)_{ij} - (A_1)_{ij} \cdot Q_{ij} - (A_2)_{ij} \cdot Q_{ij}^2 \quad (4)$$

donde r_{ij} es el coeficiente de resistencia de la cañería i, j , m es un exponente constante, k_{ij} es el coeficiente de

pérdida singular en la cañería i,j y $(A_0)_{ij}$, $(A_1)_{ij}$ y $(A_2)_{ij}$ son las constantes de la bomba que está en la cañería i,j .

El reemplazo de las ecuaciones (2), (3) y (4) en (1) conduce a :

$$(\Delta h)_{ij} = r_{ij} \cdot Q_{ij}^m + [k_{ij} + (A_2)_{ij}] \cdot Q_{ij}^2 + (A_1)_{ij} \cdot Q_{ij} - (A_0)_{ij} \quad (5)$$

- Pseudo-cañerías :

La pérdida energética, por unidad de peso de fluido, en la pseudo-cañería que une el nodo 1 (ligado al estanque de mayor nivel de energía) con el nodo 1 (ligado a otro estanque), $(\Delta h)_{11}$, es constante, independiente del gasto que circula por la pseudo-cañería y vale precisamente la diferencia de energía entre los estanques :

$$(\Delta h)_{11} = E_1 - E_1 \quad (6)$$

donde E_1 y E_1 representan la energía por unidad de peso de fluido en los nodos 1 y 1 respectivamente, m.c.f.

vii) Signo de las Pérdidas de Energía.

- Cañerías :

La pérdida de energía, en la cañería i,j , será positiva cuando el gasto sea positivo ($Q_{ij} > 0$) y las pérdidas de energía por fricción y por singularidades sean mayores que la energía adicionada por la bomba

($(\Delta h_f)_{ij} + (\Delta h_s)_{ij} > (\Delta h_b)_{ij}$), o cuando el gasto sea negativo y las pérdidas por fricción y singularidades sean menores que la energía agregada por la bomba. En cualquier otro caso, la pérdida de energía en la cañería i,j será negativa.

- Pseudo-cañerías :

Debido a la definición del sentido positivo de las pseudo-mallas, la pérdida de energía en todas las pseudo-cañerías será siempre no negativa.

viii) Pérdida de Energía en los Circuitos.

La pérdida de energía de cada circuito cerrado definido en (ii) corresponde a la suma algebraica de las pérdidas de energía de todas las cañerías y pseudo-cañerías que pertenecen a la malla o pseudo-malla. En otras palabras, la pérdida de energía en el circuito P, $(\Delta h)_P$, vale :

$$(\Delta h)_P = \sum_{i,j \in P} (\Delta h)_{ij} + \sum_{\substack{1,1 \in P \\ 1,1 \in T}} (\Delta h)_{11} \quad (7)$$

donde T es el conjunto de todos los nodos ligados a estanques. Probablemente, la pérdida de energía de al menos un circuito cerrado P es distinta de cero, o de la precisión requerida, con lo que no se cumplirá la ecuación de continuidad de energía en todos los circuitos.

ix) Gastos de Corrección.

El gasto de corrección de cada circuito P, $(\Delta Q)_P$, se evalúa mediante la siguiente expresión :

$$(\Delta Q)_P = \frac{-(\Delta h)_P}{\sum_{i,j \in P} (A_1)_{ij} + 2 \sum_{i,j \in P} [(A_2)_{ij} + k_{ij}] \cdot |Q_{ij}| + m \sum_{i,j \in P} r_{ij} \cdot |Q_{ij}|^{m-1}} \quad (8)$$

En la sección 2.2 se muestra la derivación de la ecuación (8).

x) Corrección de la Distribución de Gastos.

Se corrigen los gastos, Q_{ij} , asumidos en el paso (iv) según :

$$Q_{ij}' = Q_{ij} + (\Delta Q)_P \quad (9)$$

donde Q_{ij}' es el gasto que circulará en la iteración siguiente, por la cañería i,j . Debido a que algunas cañerías o pseudo-cañerías pertenecen a dos o más circuitos, se debe realizar más de una corrección para esas cañerías, de modo que generalmente persiste el estado desbalanceado, aunque por cierto disminuye.

xi) Criterio de Convergencia.

Se repite el procedimiento hasta que se obtenga, por convergencia, la precisión deseada, o en otras palabras, se regresa al paso (v) en caso necesario.

2.2. Determinación del Gasto de Corrección

La pérdida de energía del circuito P en la próxima iteración, $(\Delta h')_P$, queda determinada, utilizando las ecuaciones (5), (6) y (7), por :

$$(\Delta h')_P = \sum_{i,j \in P} r_{ij} \cdot (Q_{ij}')^m + \sum_{i,j \in P} [k_{ij} + (A_2)_{ij}] \cdot (Q_{ij}')^2 + \sum_{i,j \in P} (A_1)_{ij} \cdot (Q_{ij}') - \sum_{i,j \in P} (A_0)_{ij} + \sum_{\substack{1,1 \in P \\ 1,1 \in T}} (E_1 - E_1) \quad (10)$$

Además, de la ecuación (9) y ocupando el teorema del binomio, se obtiene :

$$(Q_{ij}')^m = [Q_{ij} + (\Delta Q)_P]^m = Q_{ij}^m \left[1 + \frac{(\Delta Q)_P}{Q_{ij}} \right]^m \quad (11)$$

$$6 \quad (Q_{ij}')^m = Q_{ij}^m \left[1 + m \frac{(\Delta Q)_P}{Q_{ij}} + \frac{m(m-1)}{2} \left[\frac{(\Delta Q)_P}{Q_{ij}} \right]^2 + \dots \right] \quad (12)$$

$$y \quad (Q_{ij}')^2 = [Q_{ij} + (\Delta Q)_P]^2 = Q_{ij}^2 \left[1 + \frac{(\Delta Q)_P}{Q_{ij}} \right]^2 \quad (13)$$

$$6 \quad (Q_{ij}')^2 = Q_{ij}^2 \left[1 + 2 \frac{(\Delta Q)_P}{Q_{ij}} + \left[\frac{(\Delta Q)_P}{Q_{ij}} \right]^2 \right] \quad (14)$$

Si se desprecian los términos de segundo orden y mayores en las ecuaciones (12) y (14) y se reemplazan éstas en la ecuación (10), se llega a :

$$(\Delta h')_P = \sum_{i,j \in P} r_{ij} \cdot Q_{ij}^m \left[1 + m \frac{(\Delta Q)_P}{Q_{ij}} \right] + \sum_{i,j \in P} [k_{ij} + (A_2)_{ij}] \cdot Q_{ij}^2 \left[1 + 2 \frac{(\Delta Q)_P}{Q_{ij}} \right] + \sum_{i,j \in P} (A_1)_{ij} [Q_{ij} + (\Delta Q)_P] - \sum_{i,j \in P} (A_0)_{ij} + \sum_{\substack{1,1 \in P \\ 1,1 \in T}} (E_1 - E_1) \quad (15)$$

Recordando que lo que interesa es que en la iteración siguiente, la pérdida de energía en cada circuito cerrado P sea cero, el gasto correctivo para el circuito P, $(\Delta Q)_P$, se logra al resolver la ecuación (15) con $(\Delta h')_P = 0$. Se obtiene :

$$(\Delta Q)_P = \frac{- \left[\sum_{i,j \in P} r_{ij} \cdot Q_{ij}^m + \sum_{i,j \in P} [k_{ij} + (A_2)_{ij}] \cdot Q_{ij}^2 + \sum_{i,j \in P} (A_1)_{ij} \cdot Q_{ij} - \sum_{i,j \in P} (A_0)_{ij} + \sum_{\substack{1,1 \in P \\ 1,1 \in T}} (E_1 - E_1) \right]}{\sum_{i,j \in P} (A_1)_{ij} + 2 \sum_{i,j \in P} [(A_2)_{ij} + k_{ij}] \cdot |Q_{ij}| + m \sum_{i,j \in P} r_{ij} \cdot |Q_{ij}|^{m-1}} \quad (16)$$

Debido a que $(\Delta Q)_P$ tiene intrínseco el signo, el denominador del término correctivo es la suma de los valores absolutos de los términos. El numerador corresponde al inverso aditivo de la pérdida de energía del circuito P, en la iteración actual; por lo tanto :

$$(\Delta Q)_P = \frac{-(\Delta h)_P}{\sum_{i,j \in P} (A_1)_{ij} + 2 \sum_{i,j \in P} [(A_2)_{ij} + k_{ij}] \cdot |Q_{ij}| + m \sum_{i,j \in P} r_{ij} \cdot |Q_{ij}|^{m-1}} \quad (17)$$

expresión que es idéntica a la ecuación (8).

3.- Modelo Computacional.

3.1. Descripción del Programa.

El modelo teórico presentado fue programado en lenguaje PASCAL y está adaptado para el computador DEC SYSTEM 10 (V603A) del Servicio de Computación de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

Una de las principales características del programa es que posee un procedimiento, el cual asigna una distribución inicial de caudales. Para ello, el programa utiliza las ventajas de PASCAL, con respecto a la generación dinámica de variables y al manejo de estructuras ligadas. A partir de la definición de la red, mediante el archivo de datos de entrada, genera una estructura arbórea interconectada, sobre la cual busca trayectorias desde el nodo de referencia (ligado al estanque de mayor nivel energético) a los restantes nodos. Esta búsqueda es tal, que los gastos en las cañerías que componen dicha trayectoria, se incrementan (o disminuyen) en igual magnitud el gasto que sale (o entra) de la red por el nodo considerado. De esta forma, se asegura el cumplimiento de la ecuación de continuidad de gastos en todos los nodos de la red. El algoritmo es recursivo y determina aquellas trayectorias que tienen un mínimo de cañerías, las cuales almacena para calcular, una vez resuelta la red, las alturas de presión de cada nodo.

El archivo requerido de entrada de datos consiste de :

- i) Características Generales de la Red : número de cañerías, número de nodos, número de circuitos cerrados, número máximo de iteraciones permitidas, precisión exigida para el cierre de cada circuito, dígito de control que determina la fórmula a emplear para el cálculo del coeficiente de resistencia y los parámetros requeridos por dicha fórmula.
- ii) Características de las Cañerías : número de la cañería, nodo inicial, nodo final, diámetro, longitud, variable que determina la presencia de alguna bomba o singularidad en la cañería o si ésta es pseudo-cañería, circuitos a los que pertenece y, en los casos requeridos, coeficientes de la bomba o singularidad o diferencia de altura energética entre el nodo de referencia y el nodo final si es pseudo-cañería.
- iii) Características de los Nodos : gasto que entra o sale, cota geométrica y presión en el nodo de referencia.

La salida de datos incluye el número de iteraciones realizadas en el cálculo y la imprecisión máxima en el cierre de cada circuito. A continuación se entrega, para todas las cañerías, el gasto circulante, la velocidad media, la pérdida de energía y el coeficiente de resistencia o el factor de fricción. Finalmente, se detalla la altura de presión en cada nodo.

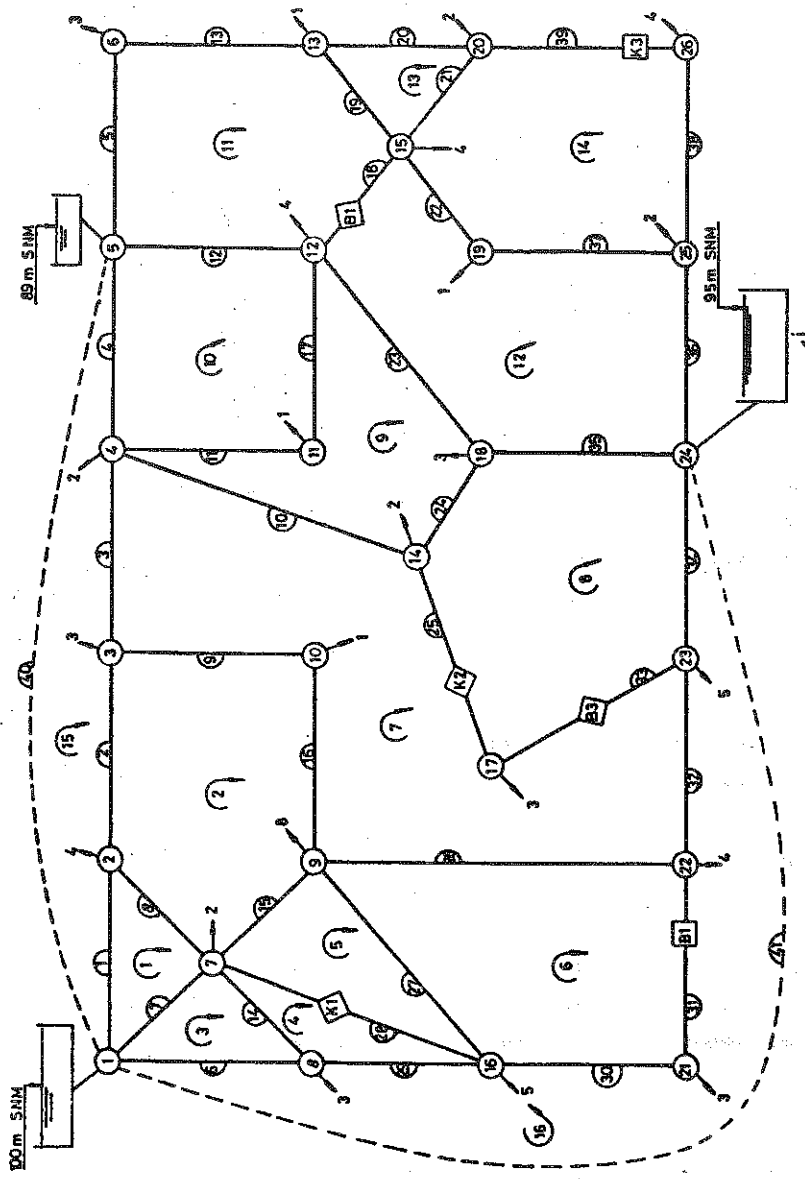
La implementación actual contempla las siguientes restricciones :

- i) número máximo de cañerías : 100
- ii) número máximo de nodos : 70
- iii) número máximo de circuitos a los que puede pertenecer una cañería (o pseudo-cañería) : 5
- iv) número máximo de cañerías que pueden converger a un nodo: 5
- v) número máximo de cañerías para una trayectoria entre el nodo de referencia y cualquier otro nodo : 10

Cabe hacer notar que las restricciones actuales del programa pueden ampliarse fácilmente para resolver alguna situación especial. Sin embargo, se han impuesto esas restricciones para no desperdiciar espacios de almacenamiento.

3.2. Ejemplo.

La Figura 2 presenta la red de ejemplo, a la cual se le determina la distribución de caudales en las cañerías y la presión en los diferentes nodos. Los archivos de entrada se muestran en las Tablas 1 y 2 y los de salida en las Tablas 3 y 4.



Cañería i
 Bomba i
 Pseudo-Cañería i
 Singularidad i
 Del nodo i salen j l/s
 Sentido del Circuito i

Figura Nº2 RED DE EJEMPLO

TABLA Nº 1 : CARACTERISTICAS DE LAS CAÑERIAS

CARACTERISTICAS GENERALES DE LA RED:

NC= 41 NN= 26 NL= 16 FRONT=300 TOLER=0,050

COEFICIENTE DE RESISTENCIA CALCULADO POR FORMULA DE HAZEN-WILLIAMS

CH= 109,99

ICANH	NODIN	NODOF	DIAM. (M)	LONG. (M)	BS	LOOP(S)	PARAMETRO(S)
1	1	2	0,1750	200,0	N	1 -15	
2	2	3	0,2500	200,0	N	2 -15	
3	3	4	0,1750	90,0	N	7 -15	
4	4	5	0,1500	178,0	N	10 -15	
5	5	6	0,0500	200,0	N	11	
6	1	8	0,1000	92,9	N	-3 -16	
7	1	7	0,1250	100,0	N	-1 3	
8	2	7	0,0875	121,0	N	1 -2	
9	3	10	0,1250	50,0	N	2 -7	
10	4	14	0,0875	150,0	N	7 -9	
11	4	11	0,1000	120,0	N	9 -10	
12	5	12	0,0625	152,0	N	10 -11	
13	6	13	0,0500	250,0	N	11	
14	7	8	0,0750	100,0	N	3 -4	
15	7	9	0,0625	179,9	N	5 -2	
16	8	10	0,1500	70,0	N	-2 7	
17	11	12	0,0750	70,0	N	9 -10	
18	12	15	0,1000	170,0	B	12 -11	41,9 1368,0 19914,9
19	13	15	0,0500	150,0	N	11 -13	
20	13	20	0,0625	50,0	N	13	
21	15	20	0,0875	70,0	N	-13 14	
22	15	19	0,0625	109,9	N	12 -14	
23	12	18	0,0750	205,0	N	9 -12	
24	14	18	0,0750	150,0	N	8 -9	
25	14	17	0,1000	100,0	K	7 -8	16500,00
26	9	22	0,1000	125,0	N	6 -7	
27	8	16	0,0500	50,0	N	5 -6	
28	7	16	0,0750	192,0	K	4 -5	31999,99
29	8	16	0,1000	80,0	N	-4 -16	
30	16	21	0,1250	200,0	N	-6 -16	
31	21	22	0,1000	150,0	B	-6 -16	30,0 958,0 9667,0
32	22	23	0,1500	200,0	N	-7 -16	
33	17	23	0,1000	129,9	B	7 -8	51,9 1297,9 26999,5
34	23	24	0,0500	200,0	N	-8 -16	
35	18	24	0,0750	58,9	N	8 -12	
36	24	25	0,0625	90,0	N	-12	
37	19	25	0,0500	68,9	N	12 -14	
38	25	26	0,0500	60,0	N	-14	
39	20	26	0,0375	199,0	K	14	1000000,00
40	1	8	0,0000	0,0	S	15	10,99
41	1	24	0,0000	0,0	S	16	5,00

TABLA # 2 : CARACTERISTICAS DE LOS NODOS
 =====

NODO	GASTO (M3/S)	COTA-GEOM. (M)
1	0.07000	100.00
2	-0.00400	80.00
3	-0.00300	78.00
4	-0.00200	75.00
5	0.00000	88.99
6	-0.00300	81.00
7	-0.00200	75.00
8	-0.00300	76.00
9	-0.00800	87.00
10	-0.00100	78.99
11	-0.00100	82.00
12	-0.00400	68.99
13	-0.00100	86.00
14	-0.00200	82.99
15	-0.00400	90.00
16	-0.00500	73.00
17	-0.00300	85.00
18	-0.00300	76.00
19	-0.00100	83.99
20	-0.00200	76.99
21	-0.00300	68.00
22	-0.00400	71.00
23	-0.00500	80.00
24	0.00000	95.00
25	-0.00200	66.99
26	-0.00400	70.00

TABLA # 3 : DISTRIBUCION DE CAUDALES
 =====

RESUELTO EN 132 ITERACIONES.

DNMAX EN LOOPS : 0.049321

ICANH	NODIN	NODOF	DIAM. (M)	LONG. (M)	GASTO (M3/S)	VELOCIDAD (M/S)	PERDIDA (M)	COEF. RESIST. (MKS)
1	1	2	0.175	200.0	0.04494	1.86	5.57	1733.8943
2	2	3	0.250	200.0	0.04693	0.95	1.06	305.2460
3	3	4	0.175	90.0	0.02799	1.16	1.04	760.2524
4	4	5	0.150	178.0	0.02407	1.36	3.31	3269.2154
5	5	6	0.050	200.0	0.00099	0.50	2.14	773809.3376
6	1	8	0.100	92.9	0.01501	1.91	5.20	12304.6956
7	1	7	0.125	100.0	0.02001	1.63	3.21	4463.0951
8	2	7	0.087	121.0	-0.00598	-0.99	-2.37	30675.6713
9	3	10	0.125	50.0	0.01594	1.29	1.05	2231.5475
10	4	14	0.087	150.0	-0.00705	-1.17	-3.97	38027.6918
11	4	11	0.100	120.0	0.00897	1.14	2.59	15877.0267
12	5	12	0.062	152.0	0.00297	0.96	4.20	198379.0606
13	6	13	0.050	250.0	-0.00200	-1.02	-9.90	967261.6720
14	7	8	0.075	100.0	0.00401	0.90	1.98	53708.0752
15	7	9	0.062	179.9	0.00299	0.97	5.05	234922.5729
16	9	10	0.150	70.0	-0.01494	-0.84	-0.53	1285.6486
17	11	12	0.075	70.0	0.00797	1.80	4.92	37595.6520
18	12	15	0.100	170.0	0.01298	1.65	-13.60	22492.4546
19	13	15	0.050	150.0	-0.00100	-0.51	-1.64	580357.0032
20	13	20	0.062	50.0	-0.00200	-0.65	-0.66	65256.2696
21	15	20	0.087	70.0	0.00500	0.83	0.98	17746.2561
22	15	19	0.062	109.9	0.00297	0.97	3.04	143563.7850
23	12	18	0.075	205.0	-0.00603	-1.36	-8.63	110101.5537
24	14	18	0.075	150.0	0.00394	0.89	2.87	80562.1111
25	14	17	0.100	100.0	-0.01299	-1.65	-7.07	13230.8356
26	9	22	0.100	125.0	0.00796	1.01	2.16	16536.5696
27	9	16	0.050	50.0	0.00198	1.00	1.93	193452.3344
28	7	16	0.075	192.0	0.00500	1.13	7.01	103119.5044
29	8	16	0.100	80.0	0.01602	2.04	5.05	10584.6844
30	16	21	0.125	200.0	0.01801	1.46	5.29	8926.1903
31	21	22	0.100	150.0	0.01501	1.91	-5.03	19816.2834
32	22	23	0.150	200.0	0.01898	1.07	2.39	3673.2757
33	17	23	0.100	129.9	-0.01399	-2.03	16.14	17200.1119
34	23	24	0.050	200.0	-0.00201	-1.02	-7.96	773809.3376
35	18	24	0.075	58.9	-0.00509	-1.15	-1.81	31687.7639
36	24	25	0.062	90.0	0.00302	0.98	2.56	117461.2864
37	19	25	0.050	68.9	0.00197	1.00	2.65	268964.2269
38	25	26	0.050	60.0	0.00300	1.53	5.00	232142.8030
39	20	26	0.037	199.0	0.00099	0.90	9.72	3123422.5969
40	1	5	0.000	0.0	-0.02010		10.99	
41	1	24	0.000	0.0	0.01013		5.00	

TABLA # 4 : PRESIONES EN LOS NODOS

=====

#NODO	GASTO (M3/S)	COTA-GEOM. (M)	PRESION (M)
1	0.07000	100.00	0.00
2	-0.00400	80.00	14.42
3	-0.00300	78.00	15.35
4	-0.00200	73.00	17.31
5	0.00000	88.99	0.00
6	-0.00300	81.00	5.65
7	-0.00200	75.00	21.78
8	-0.00300	76.00	18.79
9	-0.00800	87.00	4.73
10	-0.00100	78.99	13.30
11	-0.00100	82.00	7.72
12	-0.00400	68.99	15.79
13	-0.00100	86.00	10.76
14	-0.00200	82.99	13.29
15	-0.00400	90.00	8.40
16	-0.00500	73.00	16.73
17	-0.00300	85.00	18.17
18	-0.00300	76.00	17.19
19	-0.00100	83.99	11.09
20	-0.00200	76.99	20.42
21	-0.00300	68.00	16.44
22	-0.00400	71.00	18.56
23	-0.00500	80.00	7.03
24	0.00000	95.00	0.00
25	-0.00200	66.99	25.43
26	-0.00400	70.00	17.42

4.- Conclusiones.

El modelo teórico planteado permite resolver cualquier tipo de red cerrada de distribución, por compleja que ésta sea.

El procedimiento de asignación inicial de gastos que posee el programa computacional, redundante en una mayor facilidad de utilización por parte del usuario. Sin embargo, no se ha podido establecer, a pesar de haber realizado numerosas experiencias, cual debe ser el criterio a emplear para asignar la mejor distribución inicial en cualquier tipo de red. Como contrapartida, y aunque el costo de ejecutar el programa depende del número de iteraciones realizadas y por lo tanto de la distribución inicial, se debe mencionar el hecho de lo verdaderamente económico y rápido que resulta la resolución de redes empleando este modelo computacional. Para corroborar lo anterior, el ejemplo presentado en este trabajo tardó 22 segundos en procesarse, con un costo aproximado de \$ 300. Aun más, debe destacarse la imposibilidad de resolver manualmente redes cerradas de tamaño medio o grande, lo que amplifica el valor práctico, en estos casos, del uso de computadores.

Además, se ha podido comprobar, que para idénticas distribuciones iniciales de gastos, no existe una supremacía universal entre los métodos de Hardy-Cross y de Newton-Raphson, para todas las redes. Es decir, para ciertas redes un método es más eficiente que el otro, mientras que para otras redes cerradas sucede lo contrario.

5.- Referencias Bibliográficas

- Cross, H., "Analysis of Flow in Networks of Conduits and Conductors", University of Illinois Eng. Expt. Sta., Bull. 286, 1936.
- Jeppson, R.W., "Analysis of Flow in Pipe Networks", Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Mich., 1976.
- Wood, D.J., and Charles, C.O.A., "Hydraulic Network Analysis Using Linear Theory", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 98, N° HY7, Proc. Paper 9031, July, 1972, pp. 1157-1170.
- Varas, E. y Santa María, H., "Diseño Hidráulico de Redes de Distribución", Revista Apuntes de Ingeniería, Universidad Católica de Chile, Vol. 1, 1972.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA V. CONGRESO NACIONAL

COMPARACION DE EJES HIDRAULICOS CALCULADOS Y MEDIDOS EN EL RIO MAULE

Lincoln Alvarado M.

RESUMEN

La determinación de las condiciones de escurrimiento en cauces naturales y la confiabilidad de los resultados obtenidos es un problema frecuente para los ingenieros que se dedican al estudio de estructuras hidráulicas.

Por esta razón se presenta en este trabajo un estudio comparativo entre los valores calculados y medidos, para caudales del orden de 3.000 m³/s, realizado en el río Maule aguas abajo de la Presa Colbún.

Se incluye también una exposición resumida de los métodos de cálculo disponibles en la literatura técnica.

Ingeniero Civil, Jefe División Estudios Hidráulicos - ENDESA.
Profesor Auxiliar Escuela de Ingeniería. Universidad de Chile.