

MÉTODO PARA DETECTAR FUGAS MAYORES EN UNA RED DE AGUA POTABLE

José L. Sánchez Bribiesca y Óscar A. Fuentes Maníes
Investigadores del Instituto de Ingeniería,
Universidad Nacional Autónoma de México

RESUMEN: Se describe un método para localizar los tubos de una red de abastecimiento de agua potable en los que existen fugas relativamente grandes. Se deducen las ecuaciones necesarias. El cálculo de los gastos y presiones de flujo permanente se basa en un proceso iterativo que se ha utilizado extensamente en México. Se incluye un ejemplo para complementar la presentación del procedimiento y mostrar la forma de aplicarlo en un caso particular.

INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta que la medición del gasto en una tubería requiere de la instalación de aforadores costosos y difíciles de colocar, en tanto que la medición de las cargas piezométricas es mucho más simple y menos onerosa, en este escrito se expone un método que permite localizar los tubos de una red en los que existen fugas importantes, a partir solamente de una estimación razonablemente aproximada de las extracciones en los distintos puntos de ella y de las cargas piezométricas en los puntos de cruce en donde concurren tres o más tubos. La medición de estas cargas puede efectuarse con solo instalar en esos lugares sensores que envíen la información a un centro de registro.

Además de la introducción este trabajo contiene cuatro capítulos. En el segundo se exponen los fundamentos del método propuesto; en el tercero se describe la metodología para su empleo; en el cuarto se desarrolla un ejemplo numérico y, en el último, se anotan las principales conclusiones.

Según se indica al final del escrito, se están haciendo ensayos de laboratorio para estimar las pérdidas de carga

por fricción y locales, con el fin de apegarse más a las condiciones de una red real.

El ejemplo numérico que se desarrolla corresponde a un caso teórico y su finalidad es mostrar cómo, dadas las complicaciones y alto costo de tener sensores de presión en todos los puntos de la red, es posible, si SOLAMENTE se colocan en los sitios de cruce de la misma, determinar los tramos en donde ocurren fugas. Por supuesto que si se conocieran las presiones en todos los lugares, el cálculo de las salidas sería expedito, por cuanto bastaría calcular los gastos en cada tramo y, por diferencias, determinar a éstas. Sin embargo también se hace notar que aun en el caso de que las salidas de la red sin fugas NO se conocieran con exactitud, se puede suponer que ellas tuvieran variaciones aleatorias en torno a sus valores estimados y que aun así el método sigue sirviendo. Esto no significa que se consideren efectos transitorios en la red y tampoco que, como en algunos trabajos, se establezca una relación carga-descarga, de dudosa validez en las redes reales.

Los programas de cálculo que se mencionan en el texto están a disposición de los lectores que los soliciten.

Artículo recibido el **14 de septiembre de 1995** y aceptado para su publicación el **26 de enero de 1996**. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.

FUNDAMENTOS

En una tubería de longitud L entre cuyos extremos hay una diferencia de cargas Δh, si n es el coeficiente de rugosidad según Manning; a y r son, respectivamente el área y el radio hidráulico del tubo, haciendo $k = (n/ar^{2/3})^2$ L el gasto que circula por el tubo será

$$Q = \sqrt{\Delta h / K} \tag{1}$$

Para calcular una red de tubos es posible emplear un procedimiento iterativo de manera que si en una etapa de cálculo J el gasto circulante es Q^J y se establece que:

$$F^J = \frac{1}{2K |Q^J|} \tag{2}$$

en la etapa inmediata siguiente el gasto será:

$$Q^{J+1} = F^J \Delta h^{J+1} + \frac{Q^J}{2} \tag{3}$$

En estas expresiones J es un superíndice que representa el número de etapa de cálculo.

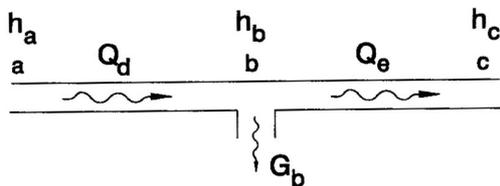


Figura 1 Tubería con un gasto de extracción G_b

En la Figura 1 se muestra un tramo de tubo en donde se indican las secciones con cargas h_a , h_b y h_c y los gastos circulantes entre ellos, Q_a y Q_b , así que si en la sección b

hay una extracción G_b , por el principio de continuidad y de acuerdo con la ecuación 1

$$F_d^J (h_a^{J+1} - h_b^{J+1}) + \frac{Q_d^J}{2} = G_b + F_e^J (h_b^{J+1} - h_c^{J+1}) + \frac{Q_e^J}{2}$$

De manera que al ordenar resulta que:

$$F_d^J h_a^{J+1} - (F_d^J + F_e^J) h_b^{J+1} + F_e^J h_c^{J+1} = \frac{Q_e^J - Q_d^J}{2} + G_b \tag{4}$$

A lo largo de una tubería en donde se presenten varias extracciones, la expresión anterior permite relacionar las cargas h en cada sección con las de las secciones localizadas inmediatamente antes y después de ella. Pero, en adición, si en una determinada sección concurren tres o más tuberías, la ecuación 4 puede generalizarse fácilmente. Así resulta que para una red se puede elaborar un sistema de tantas ecuaciones lineales no homogéneas como incógnitas, que serán las cargas en las secciones en donde se hagan extracciones. Para definir el sistema bastará con especificar las cargas en los tanques desde los cuales se abastece la red.

Como los coeficientes dependen solamente de los gastos en la etapa inmediata anterior (J), los términos independientes de éstos y de las extracciones que se suponen constantes, la secuencia del cálculo es muy simple. En efecto, si se suponen para $J=0$ los valores iniciales de los gastos Q^0 se podrán obtener las F^0 y con ellas formar el sistema cuya solución dará los valores de las cargas h, a partir de las cuales se calcularán nuevos valores Q con la ecuación 1 y así sucesivamente hasta que en dos etapas de cálculo sucesivas N-1 y N los valores Q^N sean sensiblemente iguales a los Q^{N-1} .

Este procedimiento tiene una convergencia rápida y es suficientemente aproximado. El programa SUPRED para computadora personal fue elaborado de acuerdo con estas ideas para resolver el problema descrito en el capítulo 4. El programa tiene dos opciones; puede mostrar los valores de todos los gastos Q^N y las cargas h^N , o bien solamente los valores de las cargas en los puntos de cruzamiento en donde concurren tres o más tubos y los valores de los gastos de ingreso a la red.

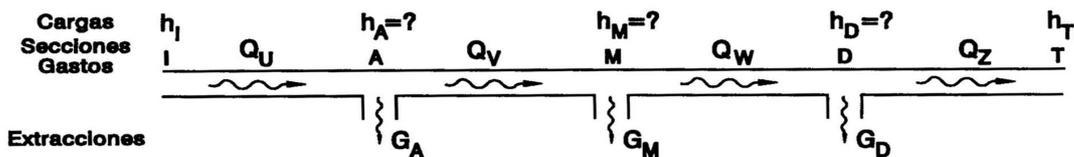


Figura 2 Tubería con tres gastos de extracción (G_A , G_M y G_D).

Con el programa *SUPRED*, para cada conjunto de extracciones se podrán determinar las cargas en todas las secciones de la red, así como los ingresos a ella, lo que equivale a considerar que unas se hubieran medido previamente y los otros se hubieran calculado a partir de la ecuación 1.

Supóngase ahora que en el tubo que va de los puntos de cruce I a T, se considera que las cargas H_I y H_T se determinaron como se indicó para un conjunto de extracciones en donde se supusieron tugas en ese tramo. Y que se considera que en las secciones A, M, y D las extracciones son las correspondientes a las de una red en donde no hubiera fugas (Figura 2).

De acuerdo con las ideas anteriormente expuestas, y dado que las cargas H_I y H_T son fijas y conocidas, se podrá elaborar el sistema:

$$\begin{aligned} -\left(F_U^J + F_V^J\right)h_A^{J+1} + F_V^J h_M^{J+1} &= \frac{G_A}{2} - F_U^J H_I \\ F_V^J h_A^{J+1} - \left(F_V^J + F_W^J\right)h_M^{J+1} + F_W^J h_D^{J+1} &= \frac{G_M}{2} \\ F_W^J h_M^{J+1} - \left(F_W^J + F_Z^J\right)h_D^{J+1} &= \frac{G_D}{2} - F_Z^J H_T \end{aligned} \quad (5)$$

La solución de este sistema permitirá calcular en cada tubo, entre dos secciones de cruce, el gasto de ingreso Q_0 y el de salida Q_Z , a partir de las cargas en esas secciones y en el supuesto de que las extracciones no incluyen fugas.

Ahora bien, si como se indica en la Figura 3, al punto de cruce I concurren varios tubos, con gastos de entrada Q_P y Q_X , y gasto de salida $Q_Y + Q_Z$ Y en ese punto hay una extracción G_I , se podrá definir de acuerdo con la ecuación de continuidad que:

$$D_I = Q_P + Q_X - Q_Y - Q_Z - G_I \quad (6)$$

De esta manera si tanto en el nudo I (Figura 3) como en los tubos concurrentes las extracciones supuestas son correctas, deberá cumplirse que $D_I=0$; de otra manera, cualquiera de las extracciones será diferente de las supuestas, lo que indicará que en la proximidad del nudo I o en él hay fugas, y se dirá que allí hay un gasto de desequilibrio $D_I \neq 0$.

El programa *DIFUMO* para computadora personal fue elaborado de acuerdo con estas ideas para resolver el problema planteado en el capítulo 4, y sirve, precisamente, para calcular los valores de los gastos de

desequilibrio en una red en donde son conocidas las cargas en los puntos de cruce, los gastos de ingreso a la red y las demandas en la red considerando que no hay fugas en ella.

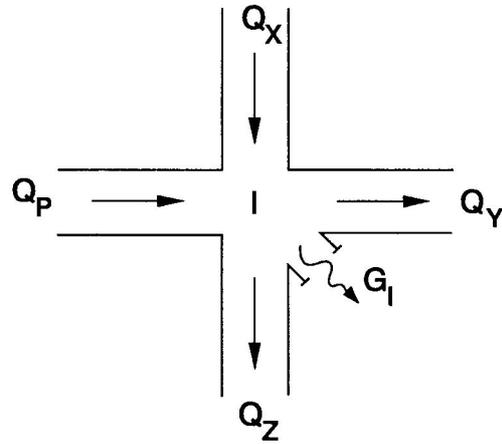


Figura 3. Cruce de unión de varias tuberías.

METODOLOGÍA

Para localizar los tubos en donde haya fugas se utilizará el programa *DIFUMO* como se indicó al final del capítulo anterior con el objeto de encontrar los nudos de cruce en donde los gastos de desequilibrio sean mayores.

Si tales nudos están aislados de manera que en ningún tubo existan dos extremos con gasto de desequilibrio grandes, las fugas se localizarán en esos puntos aislados.

Si hay varios tubos en cuyos dos extremos hay gastos de desequilibrio grandes, se empezará por identificar aquellos nudos a los que concurre solo un tubo en cuyos dos extremos hay desequilibrios grandes y las fugas se localizarán en ese tubo. Se supondrá que localizado tal tubo, podrá eliminarse de la búsqueda considerando que al nudo en donde él concurre el desequilibrio se explica por la fuga que hay en él. Se verá en cuáles tubos sigue habiendo dos extremos con desequilibrios grandes y en ellos se localizarán las fugas siguientes.

Puede suceder que los gastos de desequilibrio grandes se localicen de tal modo que solo haya tubos en cuyos dos extremos los desequilibrios sean grandes y, en tal caso, se sumarán los desequilibrios en los extremos de cada tubo y la búsqueda de fugas se hará principiando por el tubo cuya suma de desequilibrios sea mayor y terminando en el tubo cuya suma de desequilibrios sea mínima.

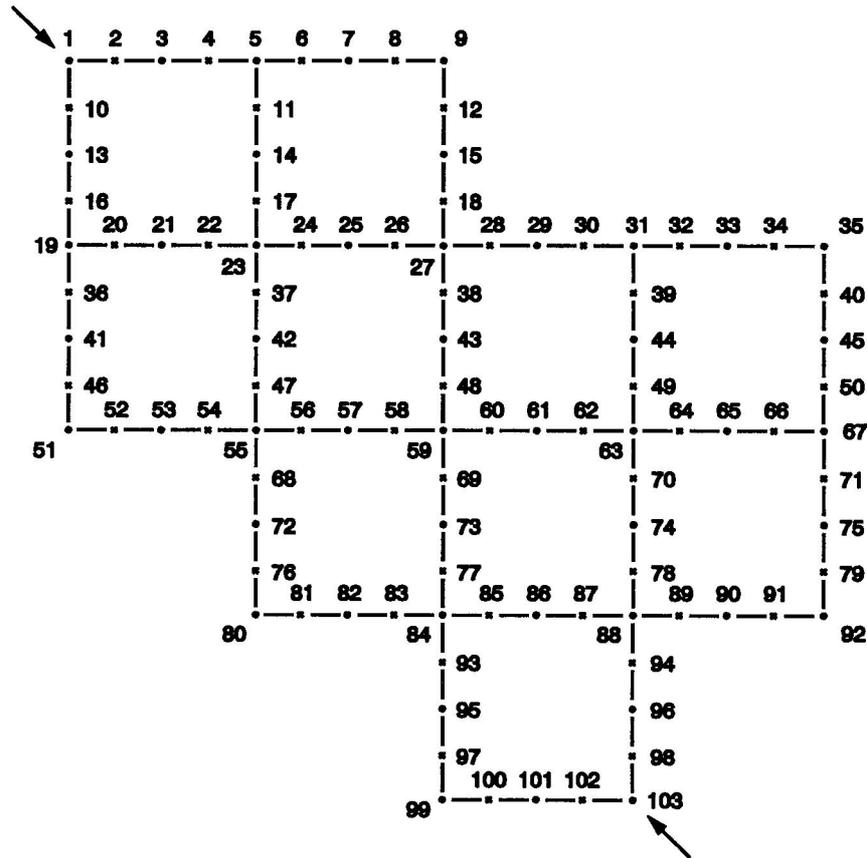


Figura 4. Red de tuberías.

De acuerdo con esta metodología se estudiaron diez casos para la red descrita en el siguiente capítulo, pero sólo se presentan cuatro para no alargar demasiado el escrito. Además, previamente se analizaron cien casos en una red más pequeña en la que se consideró que la demandas podrían tener variaciones aleatorias en torno a un valor medio supuesto. En todos los casos la metodología propuesta dio resultados satisfactorios.

Por lo demás, es pertinente señalar que si las fugas son pequeñas en comparación con las extracciones, el método pierde precisión y que, a falta de mediciones, en todos los casos estudiados, se empleó primero el programa *SUPRED* para definir los gastos de ingreso y las cargas en los puntos de cruce suponiendo que había fugas en determinados sitios y después se utilizó el programa *DIFUMO* para comprobar que las fugas se localizaban precisamente en los lugares supuestos.

EJEMPLO NUMÉRICO

En la Figura 4 se muestran las secciones (nudos) de una red en donde hay las extracciones que se anotan en la tabla 1. La Figura 5 muestra los 112 tramos de tubo entre las secciones anteriores así como los tramos 1 y 114 correspondientes a las tuberías de alimentación que

ingresan a la red los gastos Q_I y Q_{114} .

Las tuberías de alimentación tienen 100 m de longitud y un diámetro de 24 in (0.6096 m) y los tubos de la red tienen un diámetro de 16 in (0.4064 m) y la longitud de cada tramo es de 30 m. El coeficiente de rugosidad según Manning es, en todos los casos $n=0.012$. Las cargas en los tanques que alimentan a la red mediante los tubos 1 y 114 son de 100 m.

1^{er} caso

Se supone que en las secciones 27, 80 y 92 hay fugas de 0.0782 nr/s, de manera que con el programa *SUPRED* se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 2.

Con los datos de la Tabla 2 y el programa *DIFUMO* se obtuvieron los resultados que se consignan en la tabla 3, en la cual se anotan los gastos de desequilibrio en nr/s.

En la Figura 6 se marcan las secciones con gastos de desequilibrio mayores. Como ellas están aisladas, de acuerdo con la metodología expuesta en el capítulo 4 se comprueba que, efectivamente las fugas están localizadas en las secciones 27, 80 y 92.

Tabla 1. Gastos de extracción en cada sección.

Sección	Gasto de Extracción (m ³ /s)	Sección	Gasto de Extracción (m ³ /s)	Sección	Gasto de Extracción (m ³ /s)	Sección	Gasto de Extracción (m ³ /s)	Sección	Gasto de Extracción (m ³ /s)
9	0.002	8	0.008	83	0.008	62	0.016	53	0.014
35	0.002	10	0.008	89	0.008	64	0.016	72	0.014
51	0.002	12	0.008	91	0.008	66	0.016	75	0.014
80	0.002	16	0.008	94	0.008	69	0.016	82	0.014
92	0.002	18	0.008	100	0.008	70	0.016	90	0.014
99	0.002	28	0.008	11	0.016	77	0.016	95	0.014
5	0.005	30	0.008	17	0.016	78	0.016	96	0.014
19	0.005	32	0.008	20	0.016	85	0.016	101	0.014
31	0.005	34	0.008	22	0.016	87	0.016	14	0.028
67	0.005	36	0.008	24	0.016	97	0.016	21	0.028
27	0.006	40	0.008	26	0.016	98	0.016	25	0.028
55	0.006	46	0.008	37	0.016	102	0.016	42	0.028
84	0.006	50	0.008	38	0.016	3	0.014	43	0.028
88	0.006	52	0.008	39	0.016	7	0.014	44	0.028
23	0.008	54	0.008	47	0.016	13	0.014	57	0.028
59	0.008	68	0.008	48	0.016	15	0.014	61	0.028
63	0.008	71	0.008	49	0.016	29	0.014	65	0.028
2	0.008	76	0.008	56	0.016	33	0.014	73	0.028
4	0.008	79	0.008	58	0.016	41	0.014	74	0.028
6	0.008	81	0.008	60	0.016	45	0.014	86	0.028

Tabla 2

<i>I</i>	<i>H_i(m)</i>	<i>I</i>	<i>H_i(m)</i>
1	98.7415	59	94.8715
5	95.7003	63	94.7929
9	95.1877	67	94.7498
19	95.7418	80	94.9928
23	95.1537	84	95.1679
27	94.8656	88	95.2034
31	94.7675	92	94.7727
35	94.7479	99	96.7344
51	95.2843	103	98.8010
55	95.0055		

Tabla 3

<i>I</i>	<i>D_i (m³/s)</i>	<i>I</i>	<i>D_i (m³/s)</i>
1	-0.1185	59	0.0000
5	0.0000	63	-0.0000
9	0.0000	67	0.0003
19	-0.0000	80	0.0783
23	-0.0000	84	-0.0003
27	0.0782	88	0.0001
31	-0.0002	92	0.0782
35	-0.0003	99	0.0000
51	0.0000	103	-0.1162
55	-0.0001		

$Q(1) = 0.7785 \text{ m}^3/\text{s}$ $Q(114) = 0.7598 \text{ m}^3/\text{s}$

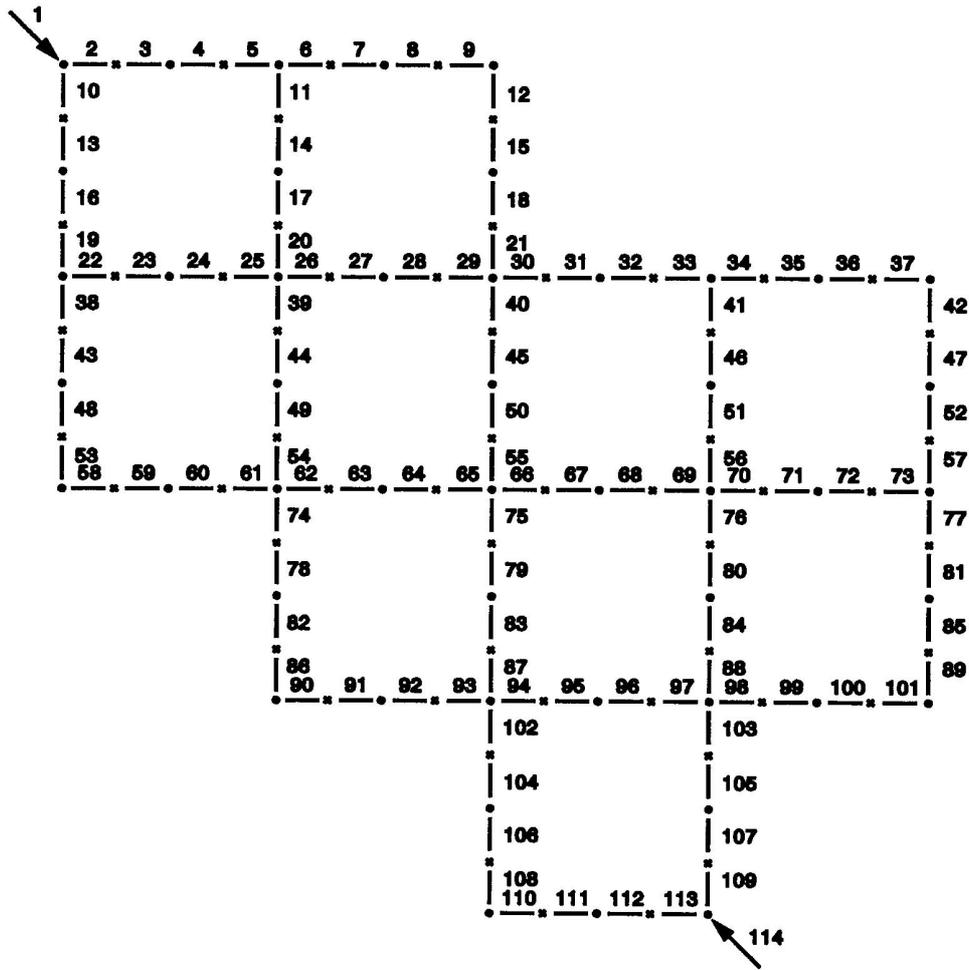


Figura 5, Tramos considerados en la red de tuberías.

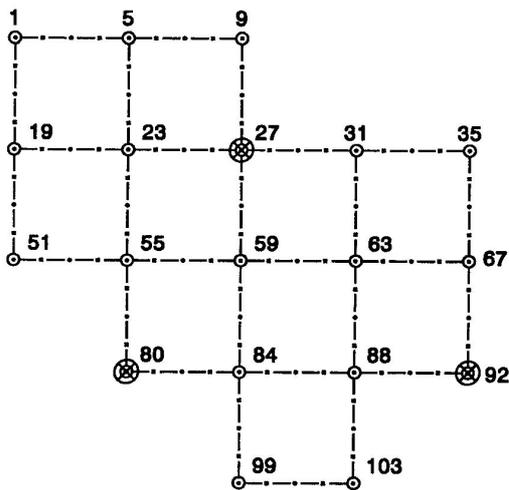


Figura 6. Secciones con gastos de desequilibrio mayores (1^{er} caso).]

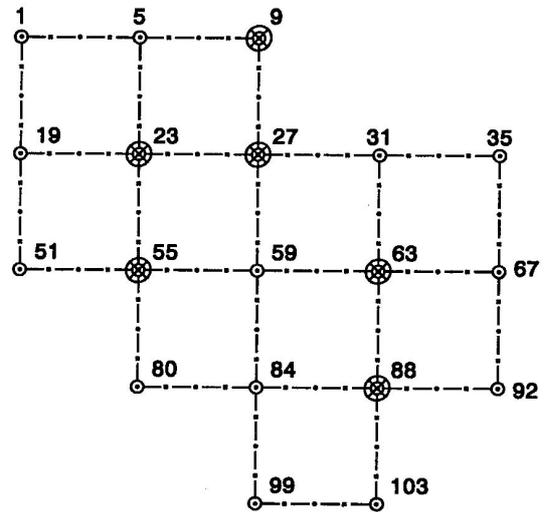


Figura 7. Secciones con gastos de desequilibrio mayores (2nd caso).

2º caso

Se supone que en las secciones 12, 37 y 70 hay fugas de 0.0782 m³/s, así que con el programa **SUPRED** se obtienen las cargas en los puntos de cruce de la red que se anotan en la **Tabla 4**. Con estos datos y mediante el programa **DIFUMO** se obtienen los resultados que se indican en la tabla 5, en donde se indican los gastos de desequilibrio en nr/s.

En la Figura 7 se anotan las secciones con gastos de desequilibrio mayores. Como en las secciones 31, 59 y 67 por una parte y en las secciones 84, 92 y 103 por la otra no hay gastos de desequilibrio mayores, se concluye que en el tramo 63-88 debe de haber una fuga, lo cual es cierto, dado que en la sección 70, entre las secciones 63 y 88 se consideró una fuga.

Por otra parte, como en las secciones 51, 59 y 80 no hay desequilibrios grandes, se concluye que habrá una fuga comprendida entre las secciones 23 y 55, lo que es verdad, porque la sección 37 está localizada allí. Así, el desequilibrio en la sección 23 se explica por la fuga en el tramo 23-55, por lo que en el tramo 23-27 ya no habría fugas. De esta manera, otra fuga quedaría localizada en el tramo 9-27, como corresponde a haber supuesto que la habría en la sección 12.

Tabla 4

<i>I</i>	<i>H_i(m)</i>	<i>I</i>	<i>H_i(m)</i>
1	98.7215	59	94.8915
5	95.6188	63	94.8005
9	95.0392	67	94.7999
19	95.7246	80	94.0820
23	95.1097	84	95.2260
27	94.8848	88	95.2626
31	94.7914	92	94.9609
35	94.7864	99	96.7720
51	95.2893	103	98.8148
55	95.0277		

$Q(1) = 0.7828 \text{ m}^3/\text{s}$ $Q(114) = 0.7555 \text{ m}^3/\text{s}$

3^{er} caso

Se supone que en las secciones 27, 57 y 86 hay fugas de 0.0782 m³/s, por lo cual mediante el programa **SUPRED**

se obtienen los datos mostrados en la tabla 6 y con ellos y el programa **DIFUMO** se obtienen los resultados que se indican en la Tabla 7.

En la Figura 8 se muestran las secciones con gastos de desequilibrio mayores. Como en las secciones 63, 92 y 103 no hay gastos de desequilibrio grandes se concluye que una fuga se localiza en el tramo 84-88, lo que es cierto puesto que hay una fuga en la sección 86.

Tabla 5

<i>I</i>	<i>D_i (m³/s)</i>	<i>I</i>	<i>D_i (m³/s)</i>
1	-0.1228	59	-0.0000
5	-0.0000	63	0.0669
9	0.0475	67	-0.0001
19	0.0000	80	0.0000
23	0.0343	84	0.0000
27	0.0303	88	0.0113
31	-0.0001	92	0.0000
35	0.0004	99	-0.0000
51	0.0000	103	-0.1119
55	0.0435		

Por otra parte, tampoco hay desequilibrios fuertes en las secciones 23, 51 y 80, de modo que habrá otra fuga en el tramo 55-59, como corresponde a la supuesta en la sección 57.

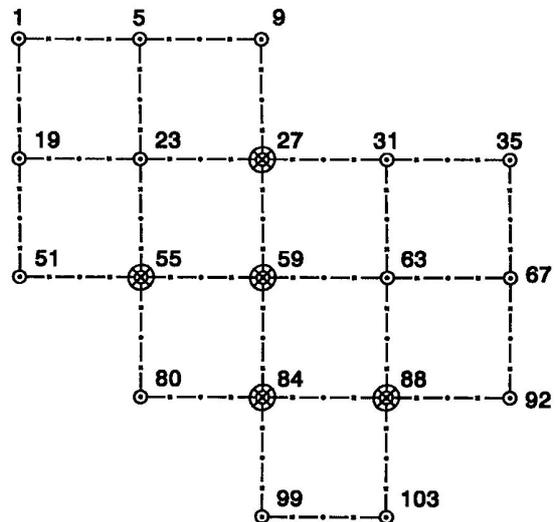


Figura 8. Secciones con gastos de desequilibrio mayores (3^{er} caso).

Tabla 6

<i>I</i>	$H_f(m)$	<i>I</i>	$H_f(m)$
1	98.7495	59	94.8656
5	95.7224	63	94.8363
9	95.2045	67	94.8264
19	95.7758	80	94.0711
23	95.1871	84	95.1363
27	94.8781	88	95.2163
31	94.8160	92	94.9570
35	94.8117	99	96.7170
51	95.3288	103	98.7998
55	95.0581		

$Q(1) = 0.7760 \text{ m}^3/\text{s}$ $Q(114) = 0.7602 \text{ m}^3/\text{s}$

Ahora bien como la fuga en el tramo 55-59 se ha justificado, solo restará por examinar el tramo 27-59, lo que permitirá localizar la fuga supuesta en la sección 27.

Tabla 7

<i>I</i>	$D_I (\text{m}^3/\text{s})$	<i>I</i>	$D_I (\text{m}^3/\text{s})$
1	-0.1160	59	0.0574
5	0.0000	63	0.0000
9	-0.0000	67	-0.0000
19	-0.0000	80	0.0001
23	-0.0000	84	0.0649
27	0.0779	88	0.0132
31	0.0000	92	0.0000
35	0.0004	99	-0.0000
51	-0.0000	103	-0.1167
55	0.0190		

4º caso

Se suponen fugas de $0.0782 \text{ m}^3/\text{s}$ en las secciones 29, 44 y 61 con lo cual el programa **SUPRED** permite obtener los resultados que se muestran en la Tabla 8 y a partir de ellos y con el programa **DIFUMO** se obtienen los resultados que se indican en la Tabla 9.

En la Figura 9 se indican las secciones con desequilibrios mayores. Nótese que en este caso no puede concluirse que en todos los nudos adyacentes a los nodos 27, 31, 59 y 63 tienen gastos de desequilibrio pequeños, por lo cual, según la metodología expuesta en el capítulo 4 se procedería a calcular:

Tramo 27-31 $0.0281 + 0.1138 = 0.1419$ (II)

Tramo 31-63 $0.1138 + 0.0721 = 0.1859$ (I)

Tramo 59-63 $0.0205 + 0.0721 = 0.0926$ (III)

Tramo 27-59 $0.0281 + 0.0205 = 0.0486$ (IV)

Tabla 8

<i>I</i>	$H_f(m)$	<i>I</i>	$H_f(m)$
1	98.7439	59	94.8028
5	95.6927	63	94.5894
9	95.1554	67	94.5799
19	95.7661	80	94.0820
23	95.1667	84	95.1623
27	94.8137	88	95.1774
31	94.5246	92	94.7984
35	94.5317	99	96.7296
51	95.3270	103	98.7970
55	95.0624		

$Q(1) = 0.7777 \text{ m}^3/\text{s}$ $Q(114) = 0.7611 \text{ m}^3/\text{s}$

De acuerdo con estos resultados se empezaría por revisar el tramo 31-63, lo que permitiría localizar la fuga en la sección 44. Después se revisaría el tramo 27-31, con lo que quedaría localizada la fuga en la sección 29. A continuación se revisaría el tramo 59-63 para localizar la fuga en la sección 61, con lo cual se habrían detectado ya todas las fugas.

Tabla 9

I	$D_I (m^3/s)$	I	$D_I (m^3/s)$
1	-0.1177	59	0.0205
5	0.0000	63	0.0721
9	0.0000	67	0.0001
19	-0.0000	80	0.0000
23	-0.0001	84	0.0001
27	0.0282	88	-0.0001
31	0.1153	92	0.0000
35	-0.0001	99	-0.0000
51	-0.0000	103	-0.1175
55	0.0000		

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en el capítulo anterior se puede concluir que el método propuesto es bastante seguro y fácil de emplear, puesto que solo requiere de la medición de las cargas en los puntos de cruce.

Sin embargo, será necesario hacer mediciones cuidadosas en el laboratorio para ver la importancia que podrían tener las pérdidas de carga en las secciones en donde haya extracciones así como en las confluencias y, sobre todo, medir en el campo.

En el Instituto de Ingeniería se está construyendo un modelo físico que permitirá calibrar el método propuesto. En un futuro artículo se darán a conocer los resultados.

No obstante sus posibles limitaciones, el método propuesto no solo es perfectible, sino que también puede usarse para hacer diagnósticos preliminares, toda vez que lo que podría ocurrir es que en lugar de fugas lo que sucede es que las extracciones están mal valuadas.

Por estas razones los autores esperan que el método que proponen pueda ser considerado ya como un primer paso para ayudar a resolver los problemas que confrontan los ingenieros que operan redes de distribución de agua potable.

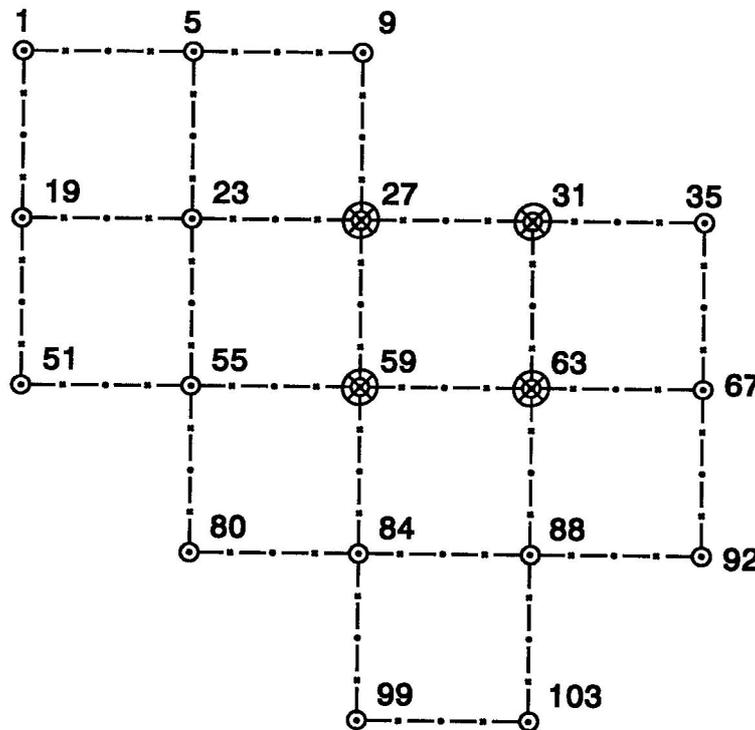


Figura 9 Secciones con gastos de desequilibrio mayores (4° caso).

LISTA DE SÍMBOLOS

L	longitud de tubería (m)
h, H	nivel o carga (m)
Δh	diferencia de cargas (m)
a, r	área (m ²) y radio hidráulico (m) de la tubería
n	coeficiente de rugosidad según Manning
Q	gasto (m ³ /s)
J	etapa de cálculo
N	etapa de cálculo enésima

subíndices **a, b, c, d, e, I, A, M y T** indican secciones de cálculo

subíndices **V, V, W, Y, P, X y Z** indican tramos de tubería en el cálculo

I punto de cruce o unión de tuberías

K, F coeficientes

REFERENCIAS

Pudar R. S., Ligget J. A. (1992). *Leaks in Pipe Networks*. Journal of Hydraulics Engineering. Vol. 118, No. 7. July, 1992.

Sánchez B. J. L., Fuentes M. O. A. (1995), Informe para la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Distrito Federal. Instituto de Ingeniería, UNAM; México D.F.

Vela A., Martínez F., García-Serra J., Pérez R. (1994), *Estrategias óptimas para la reducción de pérdidas de agua en sistemas de abastecimiento*. Ingeniería del agua. Vol. 1, No. 1. Valencia, España.