

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Modelo de la calidad del agua en redes de distribución con flujo permanente.
<i>Autor / Adscripción</i>	Velitchko G. Tzatchkov Felipe I. Arreguín Cortés Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 11(1): 61-70
<i>Fecha de publicación</i>	1996
<i>Resumen</i>	Se presenta una metodología para la simulación de la calidad del agua potable en redes de distribución, estructurada con un modelo hidráulico y un modelo fisicoquímico. Considerando flujo y concentraciones permanentes y redes con varias fuentes, se presentan algoritmos para los siguientes casos: a) cálculo de la concentración en los nodos con sustancias conservativas y no conservativas; b) cálculo de la contribución de cada fuente sobre el consumo en los nodos; c) tiempo mínimo de residencia del agua en la red. Se propone una variante del algoritmo de Dijkstra del análisis combinatorio; d) tiempo máximo de residencia del agua en la red. Se propone una variante del algoritmo de Ford-Bellman del análisis combinatorio; e) tiempo promedio de residencia del agua.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/1248

Modelo de la calidad del agua en redes de distribución con flujo permanente

Velitchko G. Tzatchkov
Felipe I. Arreguín Cortés

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Se presenta una metodología para la simulación de la calidad del agua potable en redes de distribución, estructurada con un modelo hidráulico y un modelo físicoquímicos. Considerando flujo y concentraciones permanentes y redes con varias fuentes, se presentan algoritmos para los siguientes casos: a) cálculo de la concentración en los nodos con sustancias conservativas y no conservativas; b) cálculo de la contribución de cada fuente sobre el consumo en los nodos; c) tiempo mínimo de residencia del agua en la red. Se propone una variante del algoritmo de Dijkstra del análisis combinatorio; d) tiempo máximo de residencia del agua en la red. Se propone una variante del algoritmo de Ford-Bellman del análisis combinatorio; e) tiempo promedio de residencia del agua. Se comenta el programa de computadora personal MOCARD que realiza los algoritmos propuestos.

Palabras clave: calidad del agua, modelos matemáticos, simulación, redes de distribución, agua potable, programas de cómputo, algoritmos de redes.

Introducción

La calidad del agua potable dentro de una red de distribución cambia durante el recorrido desde la planta de potabilización hasta el consumidor. La red con sus tuberías, cruceros, tanques, bombeos y otros elementos, actúa como un enorme reactor en donde cambian los parámetros físicoquímicos y biológicos del agua. Para predecir las variaciones de la calidad del agua en redes de distribución, en los últimos años se han desarrollado modelos matemáticos (AWWA, 1991), que generalmente se componen de dos partes:

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

Causas de los cambios de la calidad del agua en las redes de distribución

Una gran cantidad de factores influyen en el cambio de la calidad del agua en una red de agua potable y su estudio dependerá de cada caso en particular, por ejemplo se pueden analizar diferentes tipos de recubrimiento de los tubos o el lavado de la red. A continuación se presentan los más comunes.

Mezcla de agua de diferente calidad en la red

Las ciudades normalmente se abastecen por más de una fuente de agua. La calidad del agua en las diversas fuentes es variada y dentro de la red pueden mezclarse aguas con diferentes características físicoquímicas y biológicas. Por ejemplo, la red puede abastecerse de fuentes subterráneas (pozos) y superficiales que aportan agua de diferente calidad.

El crecimiento de las ciudades muchas veces impone la necesidad de buscar nuevas fuentes de agua potable. Uno de los elementos para decidir si una fuente nueva es adecuada o no, es la calidad del agua resultante de la mezcla del agua de la fuente nueva con las existentes. Con el uso del modelo matemático pueden calcularse los parámetros físicoquímicos resultantes de la mezcla de aguas de las diferentes fuentes que abastecen a la red. El modelo calcula también la contribución de cada fuente sobre el gasto que se consume en cada punto de la red.

Contaminación por infiltraciones

Ningún sistema de distribución de agua potable es completamente hermético, normalmente se presentan en la red fugas de diversa importancia. Si por alguna razón en una tubería se suspende el servicio, es posible que se infiltre agua contaminada de las aguas subterráneas o de alcantarillados cercanos.

Las infiltraciones se controlan manteniendo en la red la presión señalada en las normas de técnicas de diseño. El modelo hidráulico puede predecir en qué parte de la red es posible que se obtengan bajas presiones y así definir las zonas susceptibles de ser contaminadas y tomar las medidas necesarias para evitarlo.

Propagación de contaminantes en la red

Puede darse el caso de la introducción de un contaminante en uno o varios puntos de una red: un accidente en la planta de potabilización, la ruptura de una tubería en zonas altamente contaminadas o una acción premeditada. El modelo matemático puede predecir cuáles usuarios serán afectados, el tiempo en que serán afectados y el lapso requerido para recuperarse del accidente.

Decaimiento del cloro residual en la red

La concentración del cloro decae en las tuberías de la red después de la planta de potabilización. En general el decaimiento de cloro depende del tiempo de residencia del agua en la red, la temperatura y el contenido de carbón orgánico total. El modelo matemático es capaz de predecir el cloro residual en cualquier punto de la red, y de esta manera determinar la dosis óptima de cloro en diferentes puntos de la red.

Formación de trihalometanos

No obstante la gran utilidad y el uso universal del cloro como desinfectante, éste puede tener también efectos

colaterales no deseables e incluso nocivos para la salud. Una dosis excesiva de cloro residual crea problemas de sabor y olor. La mayoría de las aguas naturales contiene materia orgánica, expresada por el carbón orgánico total en los análisis del agua. El cloro entra en reacción química con la materia orgánica y forma compuestos llamados trihalometanos, THMs, como el cloroformo, el diclorobromometano y el bromoformo que en ciertas concentraciones pueden ser tóxicos. La formación de THMs es función de la dosis de cloro, los niveles de carbón orgánico total, el tiempo de contacto y el pH.

Un estudio llevado a cabo en los Estados Unidos de América (Symons *et al.*, 1975) mostró presencia de trihalometanos en el agua potable en 79 de ochenta ciudades. El modelo matemático de simulación de la calidad del agua puede predecir el cloro residual y el tiempo de residencia en todos los puntos de una red y evaluar el nivel de trihalometanos.

En este artículo se presentan las bases del modelo con flujo permanente; un modelo con flujo no permanente se presenta en Tzatchkov (1994a).

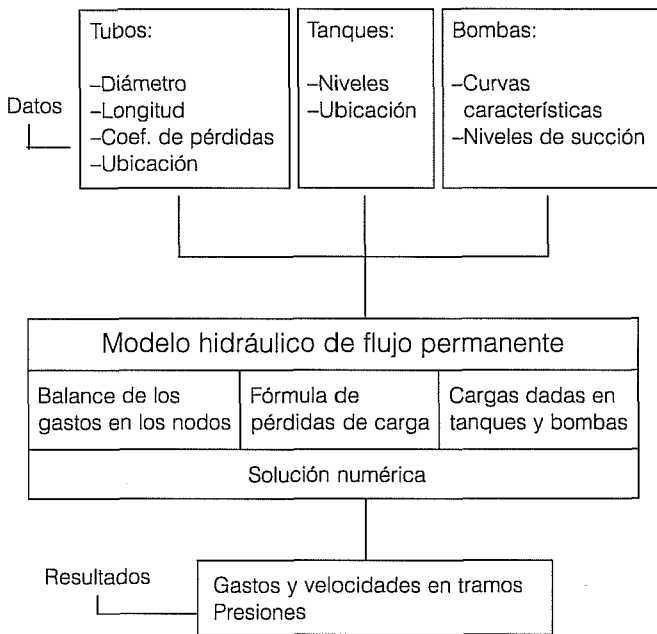
Modelo hidráulico

Se emplea el programa de computadora personal *Análisis hidráulico*, AH, para el cálculo hidráulico de redes en condiciones permanentes (Tzatchkov, 1994b). Los datos de entrada son los siguientes:

- Tuberías (tramos de la red): diámetro, longitud y coeficiente de pérdidas de carga por cortante
- Nodos: elevación y demanda de agua
- Tanques: nivel de agua (se considera constante en un análisis de flujo permanente)
- Bombas: curvas gasto-carga, nivel de succión y pérdidas de carga menores

Con base en estos datos se forma un sistema de ecuaciones no lineales de balance de los gastos en los nodos, que tiene como incógnitas las cargas en los mismos. El sistema se soluciona iterativamente por el método de Newton-Raphson. En cada iteración se soluciona un sistema de ecuaciones lineales usando técnicas de matrices porosas (George y Liu, 1981). Posteriormente se calculan los gastos en los tramos. Gracias al manejo eficiente de matrices porosas es posible el cálculo de redes grandes (hasta 3 000 nodos y tramos) en computadoras personales. El programa *Análisis hidráulico* arroja una serie de resultados, de los cuales el modelo de calidad del agua usa los siguientes: gastos en los tramos, sentido de los gastos y velocidad.

1. Diagrama del modelo hidráulico de flujo permanente



En la ilustración 1 se muestra un diagrama del modelo hidráulico de flujo permanente.

Modelo de la calidad del agua

Para el caso de flujo permanente el modelo de calidad del agua incluye los siguientes submodelos:

- Cálculo de la concentración de la sustancia modelada en los nodos de la red, dada la concentración en las fuentes. En cada simulación el modelo maneja una sustancia (una sola variable de concentración), que puede ser la concentración de cualquier sustancia en el agua (cloro, flúor, etc.) o algún parámetro de la calidad del agua que se expresa por una concentración como dureza, alcalinidad, etcétera
- Cálculo de la contribución de cada fuente sobre el consumo en cada nodo
- Cálculo del tiempo que el agua permanece en la red antes de ser consumida

Cálculo de la concentración

Caso de sustancias conservativas

Las sustancias conservativas no reaccionan con el agua y los tubos, y no pierden su masa una vez introducidas en la red. Si la red se abastece por una sola fuente, en todos los nodos se tendrá la misma concen-

tración, una vez establecido el flujo. El problema de cálculo de la concentración en los nodos no es trivial en el caso de una red abastecida por más de una fuente y con diferentes concentraciones en cada fuente.

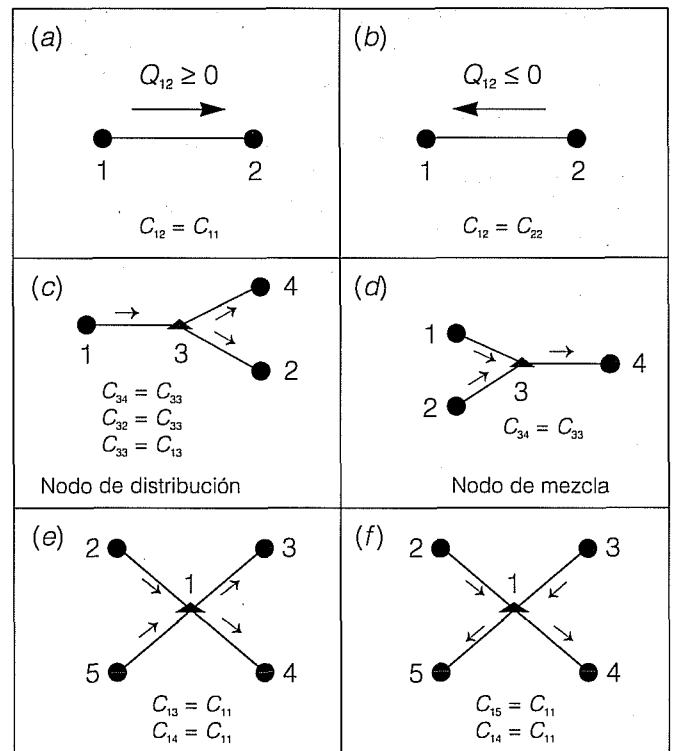
El modelo considera una mezcla completa del agua en los nodos de la red. Se considera mezcla completa cuando un nodo de la red es un punto donde se unen varias tuberías que, por una parte, introducen (ingresan) agua al nodo y, por otra, la distribuyen (egresan). La mezcla completa significa que toda el agua que ingresa se mezcla en el nodo; se obtiene una nueva concentración de la sustancia modelada en el nodo, con la cual el agua sale después a las tuberías de egreso.

En cada nodo se debe de cumplir la ecuación general de balance de masa de la sustancia modelada:

$$\sum (Q C)_{\text{entrada}} = \sum (Q C)_{\text{salida}} \quad (1)$$

donde Q es el gasto y C es la concentración en una tubería. Los subíndices *entrada* y *salida* señalan que las sumatorias se aplican solamente a las tuberías que entran o salen del nodo según el sentido del gasto. Si en el nodo se efectúa una extracción (consumo) de agua, su gasto se incluye en la suma en la parte derecha de la ecuación (1).

2. Cálculo de la concentración en diferentes tipos de nodo



La ilustración 2 muestra varios nodos típicos en una red, en cuanto a los sentidos de los gastos se refiere. Para una sustancia conservativa al inicio y al final de la tubería se tiene la misma concentración (ilustraciones 2a y b). Si en un nodo el agua ingresa por una sola tubería (nodo de distribución, ilustración 2c), en todas las tuberías que salen se tendrá la misma concentración que en la tubería que entra.

Si ingresa agua por varias tuberías se tiene un nodo de mezcla y la concentración se calcula por la siguiente ecuación, derivada de la ecuación (1):

$$C_i = \frac{(\sum Q C)_{\text{entrada}}}{(\sum Q)_{\text{salida}}} \quad (2)$$

donde Q y C son respectivamente el gasto y la concentración para las tuberías que confluyen en el nodo. El flujo continúa en las tuberías que salen del nodo de mezcla con la concentración calculada con la ecuación (2).

Usando estas consideraciones las concentraciones pueden ser calculadas por el siguiente algoritmo iterativo:

1. Se asignan las concentraciones dadas en los nodos que representan las fuentes.
2. Se revisan en un ciclo los tramos de la red para buscar tramos que presenten concentración asignada en uno de los dos nodos. Sea el nodo que tenga concentración asignada $i1$ y el otro nodo del tramo $i2$. Si el sentido del gasto es de $i1$ a $i2$, se ejecuta lo siguiente:
 - 2.1. Se asigna al tramo la concentración del nodo $i1$.
 - 2.2. Se revisa cuantos tramos introducen agua al nodo $i2$. Si es uno solo se asigna al nodo $i2$ la concentración de $i1$, en caso contrario se pasa a 2.3.
 - 2.3. Se aplica la ecuación (2), si se tienen las concentraciones en todos los tramos que introducen agua a $i2$.
3. El ciclo 2. se repite mientras haya nodos sin concentración asignada.

Caso de sustancias no conservativas

El cloro en el agua potable se considera una sustancia no conservativa, es decir, una vez introducido en la red pierde su masa debido a la reacción que se produce. El cloro reacciona con el volumen del agua contenido en los tubos y tanques, y con las paredes de éstos. Se asume que es válida una ecuación cinética de primer orden para calcular la reacción del cloro con el agua, como se muestra a continuación:

$$\frac{dC}{dt} = -K_a \cdot C \quad (3)$$

donde C es la concentración (mg/l), y K_a la constante cinética (s^{-1}).

Las hipótesis del modelo de reacción con la pared de los tubos son las siguientes:

- En la pared se tiene cierta concentración C_p de la sustancia modelada. Por lo general la sustancia se encuentra en la biocapa del tubo.
- La concentración C_p es diferente de la concentración C que se tiene dentro del flujo de agua en el interior de la tubería, y representa una de las incógnitas.
- La concentración C_p está sujeta a una reacción, igual que la concentración C que se tiene dentro del volumen de agua en el tubo. Es común considerar para esta reacción también una reacción de primer orden, es decir,

$$\frac{dC_p}{dt} = -K_p C_p \quad (4)$$

donde K_p es la constante cinética de la reacción con la pared del tubo en s^{-1} , y C_p es la concentración de la sustancia contenida en la pared en mg/m^3 .

- Existe una transferencia de masa entre la sustancia contenida en el agua y en la pared, generada por la diferencia entre las concentraciones en los dos sitios. La teoría de transferencia de masa maneja la siguiente ecuación para el flujo de masa [$mg/(m^2s)$] de la sustancia en este tipo de transferencia:

$$\text{Flujo de masa} = K_{tr} (C - C_p) \quad (5)$$

donde K_{tr} es el coeficiente de transferencia de masa entre el flujo de agua y la pared, en metros por segundo.

Las constantes cinéticas del agua K_a y de la pared K_p se miden en campo. El coeficiente de transferencia K_{tr} se calcula por fórmulas conocidas de la teoría de transferencia de masa.

Como se muestra en Tzatchkov (1994a) y en Rossman (1993), las constantes K_a y K_p pueden integrarse en una constante K :

$$K = -K_a + \frac{K_p K_{tr}}{R K_p + K_{tr}} \quad (6)$$

donde R es el radio hidráulico.

La ecuación cinética sería entonces:

$$\frac{dC}{dt} = -K \cdot C \quad (7)$$

La ecuación diferencial (7) tiene la siguiente solución:

$$C = C_0 \cdot e^{-kt} \quad (8)$$

donde C_0 es la concentración en el momento $t = 0$. En una tubería con longitud L y velocidad del flujo V el agua permanece el tiempo $t = L/V$, con lo que de la ecuación (8) se tendrá la siguiente concentración para el punto final de la tubería:

$$C = C_0 \cdot e^{-K \frac{L}{V}} \quad (9)$$

Para el cálculo de las concentraciones en los nodos puede usarse el procedimiento presentado en el *Caso de sustancias conservativas*, calculando por (9) las concentraciones en los puntos finales de cada tramo.

Los coeficientes de reacción cinética de una tubería pueden ser obtenidos en campo por el siguiente procedimiento:

- Se seleccionan dos secciones de la tubería y en ambas se mide la concentración
- Se mide la velocidad en la tubería
- Sea la concentración medida en la primera sección C_0 , la concentración en la segunda sección C , la distancia entre las dos secciones L , y V la velocidad del flujo. Se despeja entonces el valor de K de la ecuación (9).

El valor de K determinado de esta forma incluye la reacción del cloro con el volumen del agua en el tubo y con la pared de éste. Para determinar la constante de reacción con el volumen de agua K_a solamente, se extrae cierta cantidad de agua del tubo y se deposita en un frasco limpio. Posteriormente a ciertos intervalos de tiempo se mide la concentración del cloro en el agua del frasco, para obtener varios puntos de la curva de decaimiento. El valor de K_a se obtiene aplicando un ajuste exponencial entre los puntos medidos.

En varias publicaciones, por ejemplo en (*Water Quality Modeling in Distribution System*, 1991; Rossman, 1993), se reportan valores de K obtenidos en mediciones realizadas en tuberías de agua potable en operación de localidades de los Estados Unidos de América, Francia, Australia y otros países. Los valores reportados varían desde 0.55 hasta 11.09 días⁻¹.

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA, ha llevado a cabo mediciones de la concentración del cloro en diferentes puntos de la red de agua potable

del fraccionamiento El Paraje, en el estado de Morelos (Tzatchkov, et al., 1994c). La red fue simulada por el modelo con diferentes valores de K y los resultados fueron comparados con los datos de las mediciones. Se obtuvo una buena coincidencia con un valor de K igual a 1 horas⁻¹ en todos los tramos. De manera independiente se midió el coeficiente K_a , cuyos valores se obtuvieron entre 0.02 y 0.09 horas⁻¹. Estos valores de K y K_a son preliminares y deben de ser verificados en mediciones más detalladas.

Modelo de contribución de las fuentes

Con el algoritmo descrito en el *Caso de sustancias conservativas*, se dispone de un modelo que permite al mismo tiempo, calcular la contribución de cada fuente en el consumo en cualquier nodo. Para calcular el porcentaje que aporta una fuente bastaría con asignar en el punto 1 del algoritmo un valor de 100 para el nodo que representa la fuente, y valores de 0 en todas las demás fuentes. Este proceso se repite para cada una de las fuentes.

Cálculo del tiempo de residencia del agua en la red

El tiempo que permanece el agua en una red antes de ser consumida es igual al tiempo de traslado desde la fuente hasta el punto donde se consume (asumiendo que no hay tanques dentro de la red). El tiempo de traslado en un tramo de la red es igual a la longitud de éste dividida entre la velocidad del flujo; y el tiempo de traslado de una fuente hasta un nodo será la suma de los tiempos de traslado de los tramos a lo largo de una trayectoria que parte de la fuente y termina en el nodo, considerando los sentidos de los gastos.

En una red cerrada existen varios caminos de una fuente a un nodo. Para cuantificar el tiempo de residencia del agua se manejan tres tiempos: mínimo, máximo y promedio.

Tiempo mínimo de traslado

Se define como el tiempo de traslado más corto entre todos los posibles caminos de una fuente a un nodo de la red. Resulta conveniente aplicar al caso la teoría de redes, así la red de agua potable se puede representar como una red orientada. En la teoría de redes se utiliza el algoritmo de Dijkstra (Lipskii, 1988) para encontrar los caminos más cortos de un nodo fuente hasta los restantes nodos de la red. Este algoritmo se puede aplicar para redes de agua potable de la siguiente manera:

1. Se asigna un tiempo de traslado cero al nodo fuente y tiempos infinitamente grandes en los nodos restantes de la red
2. Se calculan los tiempos de traslado desde la fuente hasta sus puntos vecinos
3. El nodo fuente se excluye de la lista de nodos.
4. El nodo con valor más bajo de tiempo de traslado se asume como un nuevo nodo fuente.
5. Se repiten los puntos 2 a 4. Si en un nodo se tiene un tiempo de traslado asignado anteriormente, se asigna el nuevo valor calculado solamente cuando es menor. El cálculo termina cuando se excluyan todos los nodos de la lista

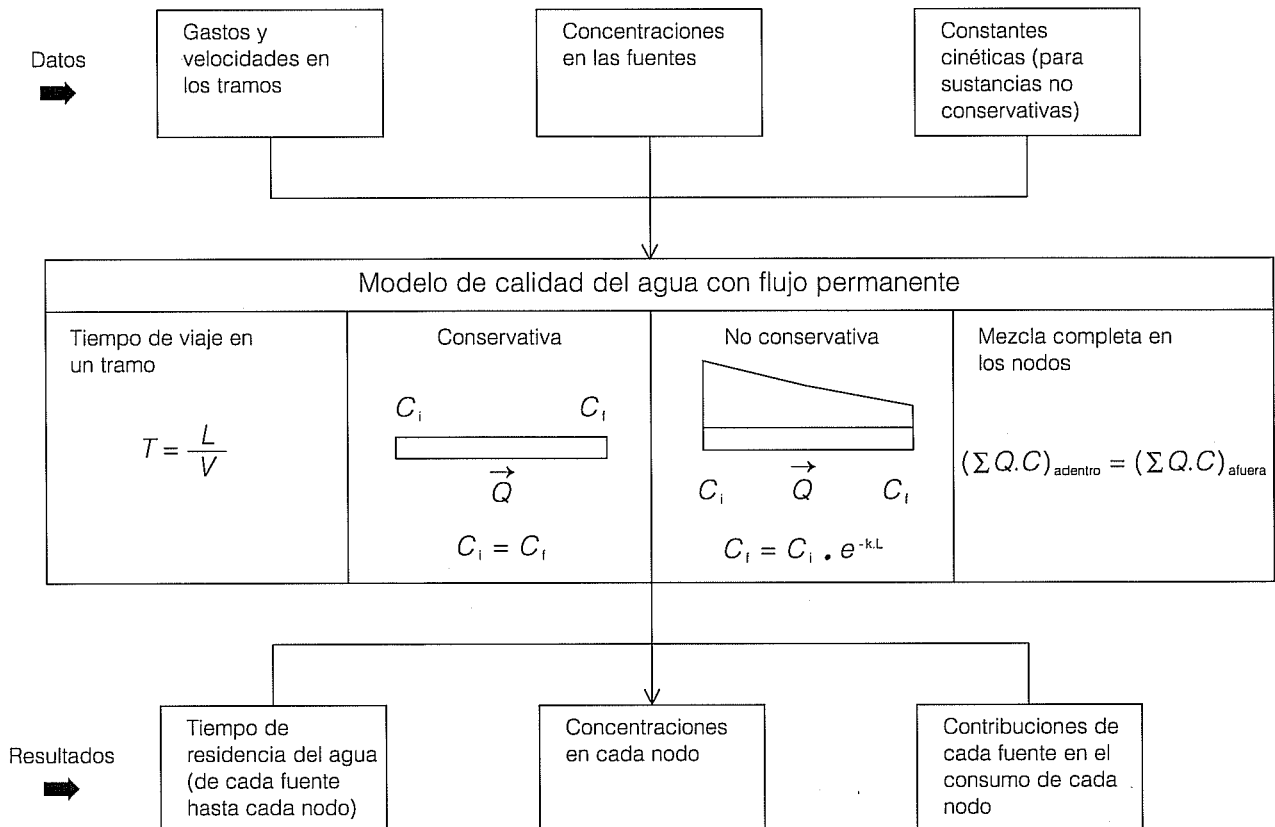
Tiempo máximo de traslado

El tiempo de traslado máximo es el mayor de los tiempos de traslado por todos los caminos de la fuente hasta un nodo de la red. Como se señala en (Boulos, 1992) el algoritmo de Dijkstra puede aplicarse para el cálculo del tiempo máximo solamente en algunos casos, en particular no funciona en una red cíclica. Una red orientada es cíclica cuando se cuenta por lo me-

nos con un par de nodos, por ejemplo u y v , tales que existe un camino de u a v , y otro de v a u . Puesto que esta situación puede estar presente en los circuitos de una red de distribución, se utiliza otro algoritmo del análisis combinatorio, llamado algoritmo de Ford-Bellman (Lipskii, 1988) que se describe de la manera siguiente:

1. Se asigna el valor cero al tiempo de traslado para el nodo fuente
2. Se recorren en un ciclo los nodos de la red. En cada nodo se ejecuta lo siguiente:
 - 2.1. Se identifican los tramos que salen del nodo (según el sentido del gasto)
 - 2.2. Para cada uno de estos tramos se calcula la suma del tiempo de traslado para el nodo inicial y el tiempo de recorrido del tramo L/V , que representa una nueva estimación del tiempo máximo en los nodos vecinos
 - 2.3. Si el valor de la nueva estimación resulta mayor que el tiempo de traslado obtenido anteriormente, se asigna este valor para el tiempo máximo de traslado del nodo

3. Diagrama del modelo de calidad del agua con flujo y concentraciones permanentes



- El ciclo 2 se repite hasta el momento en que en un ciclo completo no se obtenga una estimación mejor del tiempo máximo en ningún nodo.

Está probado (Lipskii, 1988) que se necesitan no más de $n - 2$ iteraciones, donde n es la cantidad de nodos en la red.

El algoritmo de Ford-Bellman puede usarse también para el cálculo del tiempo mínimo, pero el algoritmo de Dijkstra es más rápido.

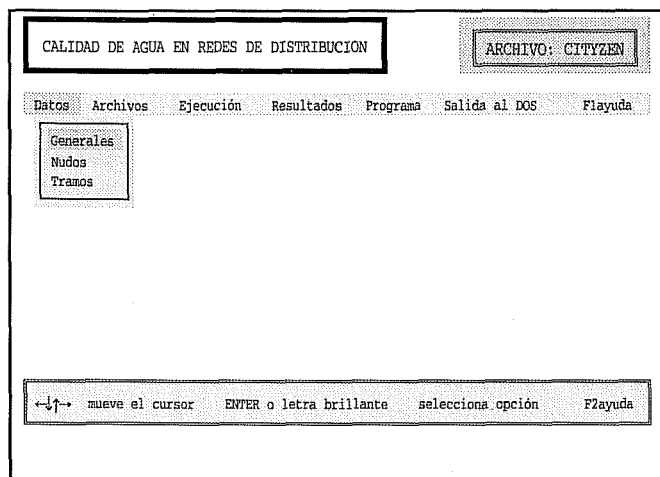
Tiempo promedio de traslado

Los tiempos mínimo y máximo de traslado de una fuente a los nodos dan solamente una idea de los límites de tiempo que el agua permanece en la red antes de ser consumida. En una red cerrada el agua llega a un nodo por diferentes caminos, con diferente edad y en diferente proporción en cada camino. Resulta de interés entonces contar con un parámetro que considere en forma integral los tiempos de traslado de los diferentes caminos con su proporción, igual que la contribución de cada fuente. Este parámetro se llama *tiempo promedio*, y para un nodo i se define como:

$$T_{ij} = \frac{\sum_k \{T_{ij} + (\frac{L}{V})_{ki}\} * F_{ki} * Q_{ki}}{\sum_k (F_{ki} * Q_{ki})} \quad (10)$$

donde T_{ij} señala el tiempo promedio de recorrido desde el nodo fuente j hasta el nodo i ; la sumatoria se toma sobre los nodos k vecinos y ubicados aguas arriba del nodo i ; $(L/V)_{ki}$ expresa el tiempo de recorrido en

4. Menú principal de MOCARD



el tramo desde el nodo k hasta el nodo i ; T_{ki} es el tiempo promedio para los nodos k ; F_{ki} es la fracción de flujo en el nodo k proveniente del nodo fuente j , y Q_{ki} es el gasto en el tramo desde el nodo k hacia el nodo i .

En otras palabras, el tiempo promedio de traslado de una fuente a un nodo es igual al valor promedio de los tiempos de traslado tomados por los diferentes caminos de la fuente al nodo, ponderados con el gasto y la contribución de la fuente.

Evidentemente para calcular el tiempo promedio en un nodo se necesitan los tiempos promedio de todos los nodos vecinos desde cuales ingresa agua al nodo. El cálculo puede realizarse por el siguiente algoritmo iterativo:

- Se asigna un tiempo promedio cero para el nodo fuente
- Se revisan en un ciclo los tramos de la red para buscar tramos con tiempo asignado en uno de sus dos nodos. Sea el nodo con tiempo asignado $i1$ y el otro nodo del tramo $i2$. Si el sentido del gasto es de $i1$ a $i2$, se ejecuta lo siguiente:
 - Se revisa cuántos tramos son los que introducen agua al nodo $i2$. Si es uno solo se asigna al nodo $i2$ el tiempo de $i1$ más el tiempo de traslado en el tramo, en caso contrario se pasa al punto 2.2.
 - Se aplica la ecuación (10), si se tienen ya asignados los tiempos de traslado en todos los nodos vecinos ubicados aguas arriba del nodo $i2$.
- El ciclo 2. se repite mientras haya nodos sin tiempo asignado.

La ilustración 3 muestra un diagrama del modelo de calidad del agua con flujo y concentraciones permanentes.

El programa de cómputo MOCARD

Los algoritmos descritos se han integrado en un programa de computadora personal llamado Modelo de la Calidad del Agua en Redes de Distribución, MOCARD. Está programado en QuickBASIC 4.5. El programa se maneja por medio de menús de opciones; en la ilustración 4 se muestra el menú principal con el submenú de datos. Los datos de entrada para el programa se pueden dividir en tres grupos:

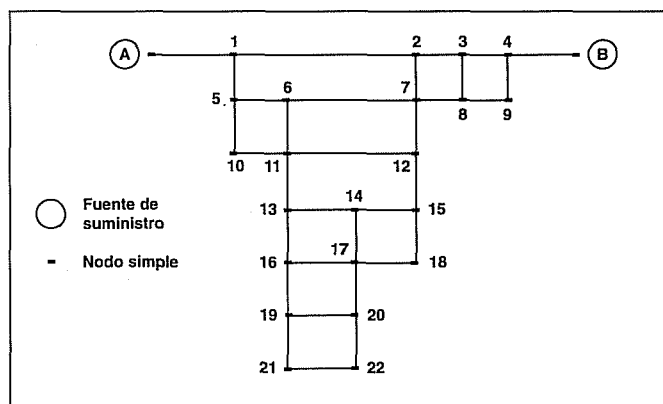
- Datos físicos para la red: diámetros y longitud de los conductos, topología de la red, ubicación de las fuentes, etcétera
- Datos hidráulicos: gastos en los tramos
- Datos de los parámetros físico-químicos: concentración en las fuentes, constantes cinéticas de reacción.

5. Resultados para los nodos

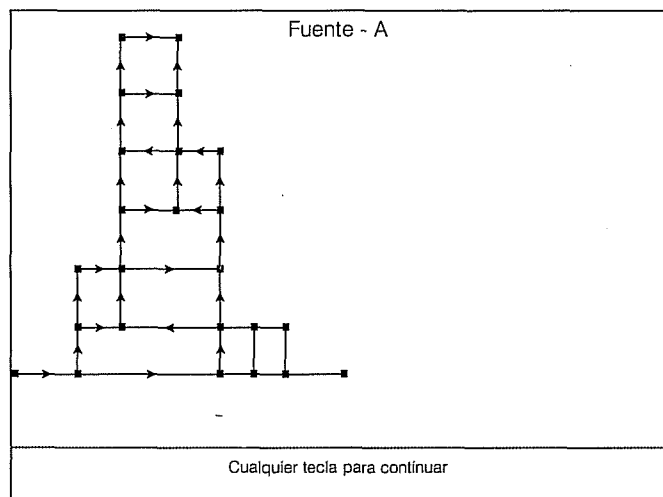
CALIDAD DE AGUA EN REDES DE DISTRIBUCION		ARCHIVO: CITYZEN						
Resultados para los nodos:				Nodo fuente: FUENTE-A				
N U D O	TI PO	DESCRIPCION	DEMANDA (l/s)	CONC. (mg/l)	INFL. (%)	T. MAX. (hr)	T. MED. (hr)	T. MIN. (hr)
1	FUENTE-A	7 TANQUE (n. cte)	-1492.3	100.0	100.0	0.00	0.00	0.00
2	1	0 NUDO SIMPLE	200.0	100.0	100.0	0.09	0.09	0.09
3	2	0 NUDO SIMPLE	100.0	100.0	57.75	0.63	0.63	0.63
4	3	0 NUDO SIMPLE	200.0	100.0	0.00			
5	4	0 NUDO SIMPLE	200.0	100.0	0.00			
6	5	0 NUDO SIMPLE	100.0	100.0	100.0	0.15	0.15	0.15
7	6	0 NUDO SIMPLE	100.0	100.0	59.61	1.02	0.56	0.38
8	7	0 NUDO SIMPLE	100.0	100.0	29.44	0.75	0.75	0.75
9	8	0 NUDO SIMPLE	200.0	100.0	0.00			
10	9	0 NUDO SIMPLE	200.0	100.0	0.00			
11	10	0 NUDO SIMPLE	200.0	100.0	100.0	0.25	0.25	0.25
12	11	0 NUDO SIMPLE	100.0	100.0	74.66	1.12	0.55	0.44

F Otra fuente F2 Zona de influencia F3 Caminos hasta F4 Caminos desde

6. Red de distribución calculada



7. Zona de influencia de una fuente



1. Datos para la red de la ilustración 6

Tramo Número	Tramo de	a	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Gasto (l/s)
1	A	1	600	1000	1492.27
2	1	2	1300	800	335.36
3	3	2	400	800	245.36
4	4	3	300	800	721.13
5	B	4	400	1000	1507.73
6	1	5	400	800	956.91
7	5	6	500	800	299.84
8	7	6	800	800	401.35
9	2	7	400	800	480.72
10	8	7	400	800	462.37
11	3	8	400	800	275.77
12	9	8	300	800	386.60
13	4	9	400	800	586.60
14	5	10	400	800	557.07
15	10	11	500	800	357.07
16	6	11	400	800	601.19
17	11	12	800	800	233.67
18	7	12	400	600	441.73
19	11	13	300	600	624.60
20	13	14	300	600	183.44
21	15	14	500	600	162.71
22	12	15	300	600	575.40
23	13	16	300	600	241.16
24	17	16	300	600	8.49
25	14	17	300	600	146.15
26	18	17	500	600	112.69
27	15	18	300	600	212.69
28	16	19	200	400	149.66
29	19	20	300	400	8.55
30	17	20	200	400	150.34
31	19	21	300	400	41.11
32	21	22	300	400	41.11
33	20	22	300	400	58.89

El programa del modelo hidráulico AH tiene la posibilidad de generar un archivo de salida de resultados que son datos (físicos e hidráulicos) para el programa MOCARD. Los datos pueden ser introducidos también manualmente por el programa.

Los resultados se presentan en tablas o gráficamente. La ilustración 5 muestra la tabla de resultados para los nodos que incluye: concentración, porcentaje de influencia de la fuente sobre el consumo en cada nodo, y tiempos de residencia mínimo, promedio y máximo. Una tabla de este tipo se visualiza para cada una de las fuentes.

Ejemplo numérico

La ilustración 6 muestra el esquema de una red tomada del artículo de Boulos *et al.* (1992). Esta red fue

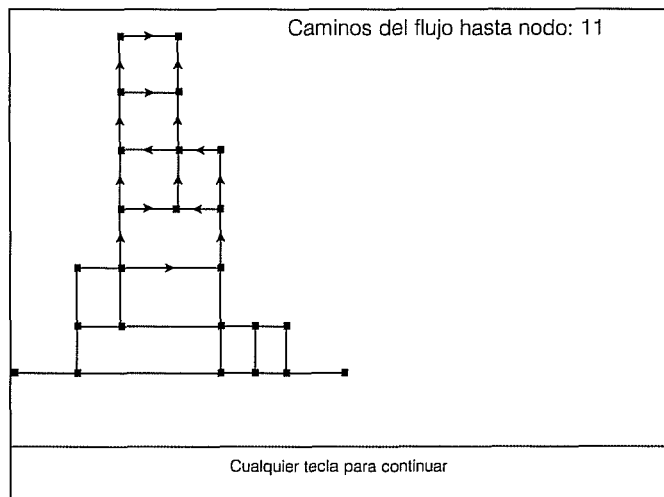
1. Resultados para la red de la ilustración 6

Nodo Número	Fuente A				Fuente B			
	Influencia %	Tiempo medio	Tiempo máximo	Tiempo mínimo	Influencia %	Tiempo medio	Tiempo máximo	Tiempo mínimo
1	100.00	0.09	0.09	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00
2	57.75	0.63	0.63	0.63	42.25	0.34	0.34	0.34
3	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.12	0.12	0.12
4	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.06	0.06	0.06
5	100.00	0.15	0.15	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00
6	59.61	0.56	1.02	0.38	40.39	0.74	0.66	0.66
7	29.44	0.75	0.75	0.75	70.56	0.42	0.46	0.38
8	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.29	0.32	0.26
9	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.15	0.15	0.15
10	100.00	0.25	0.25	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00
11	74.66	0.55	1.12	0.44	25.34	0.79	0.83	0.75
12	45.08	0.94	1.59	0.82	54.92	0.62	1.31	0.45
13	74.66	0.59	1.15	0.48	25.34	0.83	0.87	0.79
14	60.76	0.89	1.88	0.61	39.24	0.92	1.59	0.74
15	45.08	0.98	1.64	0.86	54.92	0.66	1.35	0.49
16	73.96	0.76	4.87	0.58	26.40	1.11	4.58	0.89
17	53.93	1.19	2.09	0.77	46.07	1.10	1.81	0.90
18	45.08	1.09	1.75	0.97	54.92	0.77	1.46	0.61
19	73.96	0.81	4.92	0.62	26.04	1.15	4.63	0.94
20	55.01	1.30	6.14	0.82	44.99	1.19	5.86	0.94
21	73.96	1.07	5.17	0.88	26.04	1.41	4.89	1.19
22	62.80	1.40	6.32	0.99	37.20	1.45	6.03	1.12

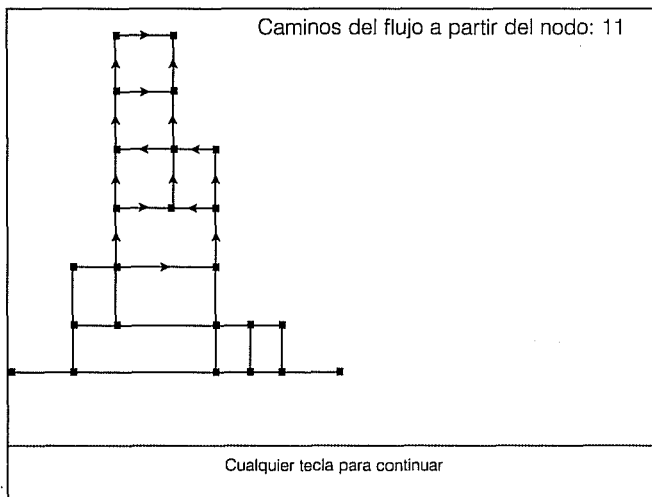
calculada por MOCARD con fines de comparación. La red comprende 33 tramos, 22 nudos y dos fuentes denominadas con A y B. Los datos de la red y los gastos en los tramos se dan en el cuadro 1. En el cuadro 2 se muestran los resultados obtenidos por MOCARD que prácticamente coinciden con los resultados dados en Boulos (1992).

La ilustración 7 muestra la zona de influencia de una de las fuentes en una red, obtenida por el programa. La ilustración 8 muestra los caminos del agua de las fuentes hasta un nodo seleccionado, y la ilustración 9 los caminos del agua que parten del mismo nodo. Las ilustraciones provienen de la pantalla de la computadora.

8. Caminos hasta un nodo



9. Caminos que parten de un nodo



Conclusiones

La calidad del agua potable cambia dentro de la red de distribución después de la planta de potabilización. Para evaluar estos cambios es importante calcular el tiempo de residencia, las concentraciones en los nodos y la contribución de las fuentes. El modelo propuesto puede realizar los cálculos en redes grandes. Los algoritmos iterativos propuestos son eficientes y evitan la solución de sistemas de ecuaciones con gran número de incógnitas.

Recibido: febrero, 1995

Aprobado: julio, 1995

Referencias

- AWWA Research Foundation y Environmental Protection Agency. 1991. *Water Quality Modeling in Distribution Systems*. Proceedings of the Technology Transfer Conference; February 4-5; Cincinnati, Ohio.
- Boulos, P. F.; T. Altman; y K. Sadhal. 1992. Computer modeling of water quality in large multiple source networks. *J. Appl. Math. Modeling* 16(8):439-445.
- George, A. y J. W. H. Liu. 1981. *Computer Solution of Large Sparse Positive Definite Systems*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Lipskii, B. 1988. [*Análisis combinatorio para programadores*]. Mir, Moscú (en ruso).
- Rossman, L. A. 1993. The EPANET Water Quality Model. *Integrated Computer Applications in Water Supply, Vol.2*, England: Research Studies Press Ltd. y John Wiley & Sons Inc.: p. 79-93.
- Symons, J. M.; T. A. Bellar; J. K. Carswell; J. DeMarco; K. L. Krapp; G. G. Robeck; D. R. Seeger; C. J. Sloccum; B. L. Smith y A. A. Steevens. 1975. National organic reconnaissance survey for halogenated organics. *J. Am. Water Works Assoc.* 67:634-647.
- Tzatchkov, V. G. 1994a. Cálculo numérico del decaimiento del cloro en redes de agua potable. *Memorias del XIII Congreso Nacional de Hidráulica*, septiembre 21-24; Puebla, México.
- Tzatchkov, V.G. y J. Izurieta D. 1994b. *Manual de Diseño de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro II: Proyecto. 1a Sección: Agua Potable, Tema: Redes de Distribución*. Comisión Nacional del Agua, México.
- Tzatchkov, V. G.; F. I. Arreguín C.; R. C. Bonilla T. y X. Osnaya B. 1994c. *Informe final del proyecto Modelo de Simulación de la Calidad del Agua en Redes de Distribución*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México.

Abstract

Tzatchkov V. and F.I. Arreguin-Cortés. "Water Quality Model for Continuous Flow Distribution Networks". *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol. XI. Num 1, pages 61-70, January-April, 1996.

A method is presented to model the water quality in a distribution network. The system includes hydraulic and physico-chemical models. Steady-state flow and concentrations, and multiple-source networks are assumed. Algorithms are presented for the following cases: a) Calculation of conservative and non-conservative substance concentrations at junction nodes. b) Calculation of contribution of source to node. c) Minimum water age. A variant of Dijkstra's algorithm is proposed. d) Maximum water age. A variant of the Ford-Bellman algorithm is proposed. e) Average water age. Some information is also presented about the personal computer program, MOCARD, where the proposed algorithms are implemented.

Key Words: water quality, mathematical models, simulation, distribution networks, drinking water, computer programs, algorithms on graphs.