

Modelación de Calidad de Agua Utilizando un Algoritmo Recursivo Iterativo

Saldarriaga, Juan

Ingeniero Civil, MSc.

Profesor Titular Universidad de los Andes, Director del Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA). E-mail: jsaldarr@uniandes.edu.co.

Cortés, Oscar

Ingeniera Civil, MSc..

Investigadora Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA). E-mail: oj.cortes43@egresados.uniandes.edu.co.

XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología

Sociedad Colombiana de Ingenieros

Bogotá D.C. 22, 23, y 24 de mayo de 2008

Resumen. El algoritmo desarrollado modela la calidad de agua en redes de distribución bajo condiciones constantes de demanda y alturas en los tanques, determinando la distribución espacial de las sustancias disueltas en el agua a lo largo de la red, ofreciendo así una perspectiva global de cómo el sistema reacciona. Para calcular la calidad de agua, el algoritmo representa la red de acueducto como un grafo dirigido y recorre los nodos en secuencia desde aguas arriba hacia aguas abajo, estableciendo la concentración de la sustancia en cada nodo por el que va pasando; de esta manera, se optimiza no solamente el tiempo de cálculo sino también el espacio de uso de memoria del computador. En el recorrido de los nodos, el número de operaciones es igual al número de nodos de la red. Se modela la edad, concentración de un soluto, trazador y trazador inverso.

Palabras clave. Calidad del agua, algoritmo recursivo-iterativo, redes de distribución.

1. Introducción

Los modelos hidráulicos se han utilizado, tanto en las fases de diseño de proyectos como en la operación de la red, para garantizar fundamentalmente que el agua llegue a los puntos de consumo con las condiciones de presión y caudal requeridas, sin preocuparse por la calidad del agua en el momento de ser consumida.

En la mayoría de los casos, la calidad del agua cambia en la red, de la planta de tratamiento hasta llegar al consumidor, por efecto de la iteración del agua con las paredes de las tuberías, accesorios y cualquier otro componente de la red de distribución. Durante el tiempo que el agua permanece en la red, las sustancias más reactivas contenidas en la misma, como por ejemplo el cloro utilizado en la desinfección, reaccionan o se combinan con otras sustancias presentes en el seno del agua o adheridas a las paredes de las tuberías.

El objetivo de los modelos de calidad es determinar la evolución de los parámetros de calidad de agua desde la planta de tratamiento hasta el consumidor, donde debe verificarse realmente que se cumplan las normas.

Los modelos de calidad permiten determinar, en todos los puntos de la red y en cualquier instante del período de simulación:

- El movimiento de contaminantes o de cualquier sustancia en un sistema de distribución de agua, desde su inyección.
- La concentración o el valor de un determinado parámetro de calidad.
- La edad o el tiempo de retención del agua dentro de la red
- El porcentaje de procedencia del agua desde cada una de las fuentes de suministro.

En esta investigación se desarrolla un algoritmo recursivo iterativo para la modelación de la calidad de agua en período estático, implementado en el lenguaje de programación Delphi 6.0 para el programa REDES, desarrollado en el Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de Los Andes (CICUA). Adicionalmente, para la modelación de la calidad de agua se supone movimiento en una sola dirección (movimiento en sentido del flujo), hidráulica de flujos de redes, mezcla total en los nodos, dispersión despreciable y solamente una sustancia con una o varias fuentes de alimentación.

2. Estructura de Datos

En este capítulo se describe las estructuras de datos utilizadas en el desarrollo del algoritmo para la modelación de la calidad de agua en período estático.

2.1. Lista

Una lista es una estructura de datos donde el primer elemento almacenado es el primer elemento en ser accedido. Su comportamiento es similar a una cola de un banco o cafetería, donde una persona para ser atendida debe primero esperar a que las personas delante de ella sean atendidas. De esta manera, una lista es una estructura de datos ideal para almacenar información estableciendo el orden en el cual se desee que

los elementos sean accedidos. Las operaciones de una lista son adicionar, que consiste en almacenar el elemento en la cola de la lista, y obtener, que consiste en acceder al primer elemento almacenado.

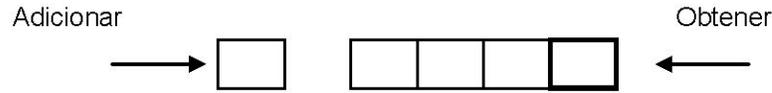


Figura 1 Representación de un Lista.

2.2. Pila

Una pila es una estructura de datos donde el último elemento en ser almacenado es el primero en ser accedido. Su comportamiento es muy similar a una pila de platos o de libros, donde el último elemento añadido a la pila es colocado en la cima. El acceso al último elemento insertado en la pila es muy fácil, mientras que el acceso a los elementos que fueron añadidos de primero es muy complicado. De esta manera, una pila es una estructura de datos apropiada si sólo se desea acceder al elemento que se encuentra en el tope (cima) de la pila y se desea que el resto de los elementos queden inaccesibles en principio. Las operaciones de una pila son empilar, que es colocar el elemento en el tope de la pila, y desempilar, que corresponde a tomar el elemento que se encuentra en el tope de la pila.

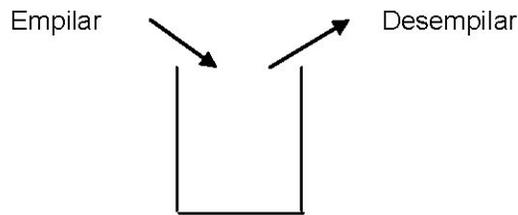


Figura 2 Representación de un Pila.

2.3. Grafo

Un grafo es una estructura de datos que está definida por un conjunto $U(G)$ de elementos llamados uniones, un conjunto de $A(G)$ de elementos llamados arcos, y una relación de incidencia, la cual asocia cada arco con dos uniones. Si las dos uniones de un arco se encuentran ordenadas, es decir, el arco tiene una unión inicial y una unión final, se dice que el grafo es dirigido. Una red de distribución es un grafo dirigido debido a que el sentido de los flujos en las tuberías establece el orden de las uniones en los arcos.

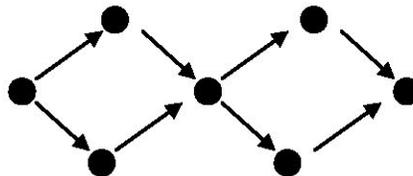


Figura 3 Representación de un Grafo.

2.3.1. Unión Padre

Las uniones padres de una unión, son aquellas que se encuentran en el nivel inmediatamente superior conectadas a la unión través de un arco, es decir, la unión inicial de un arco es la unión padre de la unión final del arco. Estas distinciones son importantes para establecer un nivel jerárquico entre las uniones de un grafo. En una red de distribución, el sentido en que viaja el agua a través de la red establece el orden de la secuencia en que se debe recorrer las uniones de la red para modelar la calidad de agua.

2.3.2. Grafo Acíclicos

Un grafo acíclico es un grafo que no contiene ciclos en toda su estructura, siendo un ciclo el subconjunto de uniones y el subconjunto de arcos del grafo con orden jerárquico, donde la unión inicial del primer arco es la unión final del último arco. En una red de distribución no se presentan ciclos debido a que el agua viaja desde la unión con mayor energía hasta la unión con menor energía.

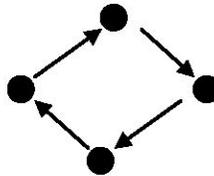


Figura 4 Representación de un ciclo en un Grafo.

3. Cálculo de la Calidad de Agua

La calidad de agua en un nodo se puede calcular, conociendo la calidad de agua (concentración, edad ó trazador) al final de los tubos que lo abastecen. La calidad de agua en un nodo es el promedio ponderado por caudal de la calidad de agua de cada tubo que lo abastece.

$$C_k = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i \cdot Q_i)}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad [1]$$

En donde:

- n: es el número de tubos que alimentan al nodo k.
- C_k : es la calidad de agua (concentración, edad o trazador) en el nodo k.
- C_i : es la calidad de agua al final del i-ésimo tubo que alimenta al nodo k.
- Q_i : es el caudal del i-ésimo tubo que alimenta al nodo k.

Se puede calcular la calidad de agua al final de un tubo conociendo la calidad de agua aguas arriba del tubo y conociendo los mecanismos de reacción en el tubo. La ecuación utilizada para esto es la siguiente:

$$C = C_0 \cdot e^{-K \cdot t} \quad [2]$$

donde:

- C: es la calidad de agua aguas abajo del tubo.
- C_0 : es la calidad de agua aguas arriba del tubo.

K: es un coeficiente general de reacción del químico con el cuerpo de agua y las paredes del tubo. Para sustancias conservativas como los trazadores, el valor de K es cero.

t: es el tiempo promedio de viaje del agua en el tubo.

En el cálculo de la edad al final del tubo, la ecuación [2] no es aplicable y se utiliza la siguiente ecuación:

$$C = C_0 + t \quad [3]$$

4. Algoritmo ARI

El algoritmo ARI permite realizar cálculos complejos que requieren del recorrido de todos los nodos y/o tubos de la red de tuberías. Se destaca por ser un método que ha probado su efectividad en procesos como el cálculo estático de calidad del agua en redes grandes sustituyendo metodologías tradicionales que se demoran muchísimo más en la finalización de los cálculos.

El modelo matemático ARI se caracteriza por ser robusto y genérico, permite su adaptación al cálculo de varios tipos de variables según el interés particular, sin importar si la sustancia a analizar es o no conservativa.

La metodología de este algoritmo consiste en recorrer consecutivamente, una a una, las uniones de la red almacenadas en una lista (sin importar como fueron adicionadas), revisando, para cada unión, que sus uniones padres se encuentren previamente con la concentración calculada, para de esta manera proceder a calcular la concentración de la unión. Se pueden presentar 3 casos: el primero y más sencillo es cuando todas las uniones padres ya se encuentran con la concentración calculada, por lo que la concentración de la unión puede ser estimada. El segundo caso, es cuando la unión tiene una unión padre cuya concentración no se encuentra calculada, de tal manera que se debe proceder primero a calcular la concentración de la unión padre, para calcular la concentración de la unión. El tercer caso ocurre cuando una de las uniones padres no tiene su concentración calculada, y a la vez una de las uniones padre de esta unión tampoco tiene la concentración calculada. En este último caso, se debe primero calcular la concentración de la unión más aguas arriba (unión dos niveles aguas arriba) para después calcular la concentración de la unión padre y así poder calcular la concentración de la unión. Si en el recorrido consecutivo de la lista la unión ya se encuentra con la concentración calculada, simplemente se sigue con la siguiente unión en la lista.

Para conservar el orden y programar el algoritmo de manera iterativa, consumiendo así menor tiempo y memoria del computador, se hacen uso de estructuras de datos como listas y pilas, estructuras descritas en el Capítulo 2. La lista se utiliza para almacenar todas las uniones de la red y poder realizar un recorrido consecutivo de las uniones sin repetir ninguna. La pila se utiliza para almacenar las uniones cuyas uniones padres no se encuentren previamente con la concentración calculada y poder acceder a ellas en orden inverso en el cual fueron guardadas.

A continuación se presenta un ejemplo del cálculo de la calidad de agua para una red pequeña de acueducto con los sentidos del flujo ya establecidos.

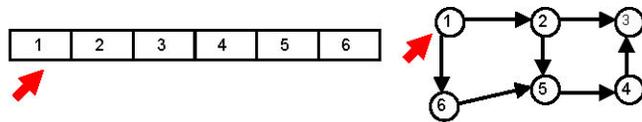


Figura 5 Recorrido de la Lista. Unión 1

La unión 1 no tiene ninguna unión padre, se calcula su concentración.

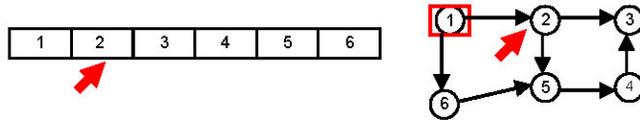


Figura 6 Recorrido de la Lista. Unión 2

La unión 2 sólo tiene una unión padre, que ya se encuentra con la concentración estimada. Se calcula la concentración de la unión 2.

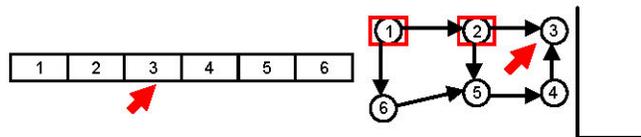


Figura 7 Recorrido de la Lista. Unión 3

La unión 3 tiene dos uniones padres, una ya se encuentra calculada pero la unión 4 todavía no. Se guarda la unión 3 en la pila.

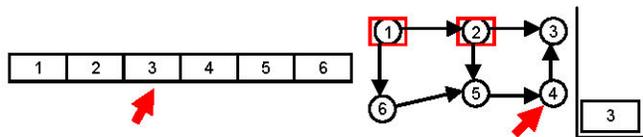


Figura 8 Recorrido de los padres del Unión 3

La unión 4 tiene como unión padre la unión 5 que tampoco ha sido calculada. Se guarda la unión 4 en la pila.

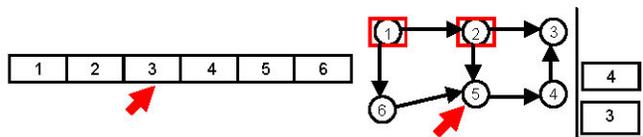


Figura 9 Recorrido de los padres del Unión 4

La unión 5 tiene dos uniones padres, la unión 6 no tiene su concentración estimada. Se guarda la unión 5 en la pila.

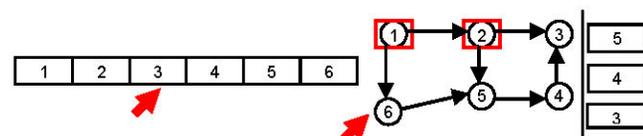


Figura 10 Recorrido de los padres del Unión 5

La unión 6 tiene sus uniones padres calculadas. Se calcula la concentración de la unión. Se toma la unión 5 que está en el tope de la pila.

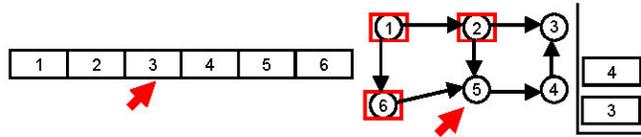


Figura 11 Cálculo de la concentración de la Unión 6

La unión 5 ya tiene todas sus uniones padres con la concentración calculada. Se calcula la concentración. Se toma la unión 4 que está en el tope de la pila.

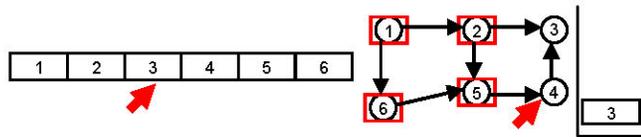


Figura 12 Cálculo de la concentración de la Unión 5

La unión 4 ya tiene todas sus uniones padres con la concentración calculada. Se calcula la concentración. Se toma la unión 3 que está en el tope de la pila.

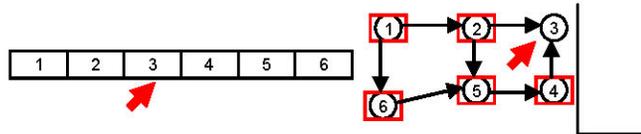


Figura 13 Cálculo de la concentración de la Unión 4

La unión 3 ya tiene todas sus uniones padres con la concentración calculada. Se calcula la concentración.

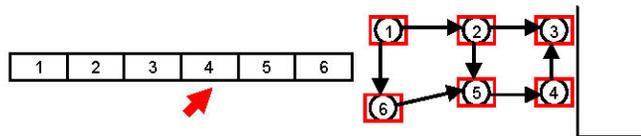


Figura 14 Cálculo de la concentración de la Unión 3

Se sigue recorriendo la lista. Como todas las uniones se encuentran calculadas se termina la simulación de la calidad de agua en periodo estático.

5. Resultados

Para poder hacer el cálculo de las rutinas de calidad del agua es necesario haber calculado previamente la hidráulica de la red, las rutinas actuales suponen flujo permanente.

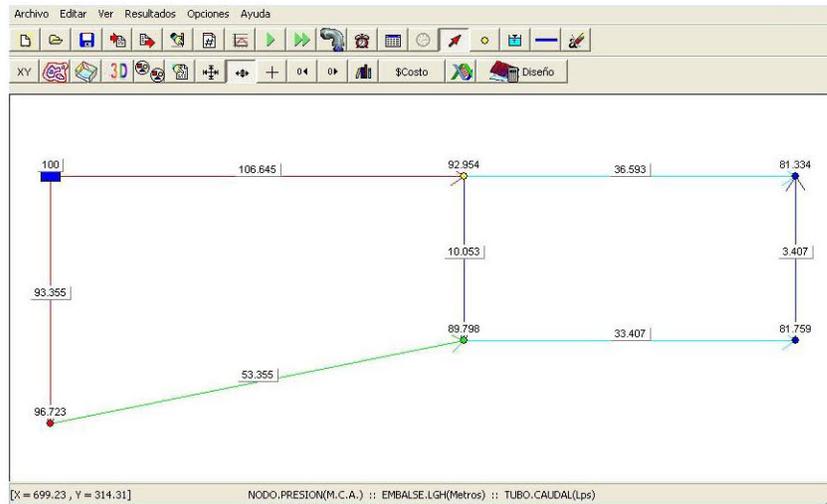


Figura 15 Red ejemplo para la modelación de la calidad de agua

El caudal en las tuberías tiene unidades de l/s y la presión en los nodos tiene unidades de M.C.A.

Para calcular la concentración de un soluto se debe definir el valor y las unidades de concentración en los embalses (fuentes de abastecimiento, tanques de cabeza fija). Se supone una concentración de 1 Kg./m^3 en el embalse. A continuación se presenta las concentraciones en los nodos.

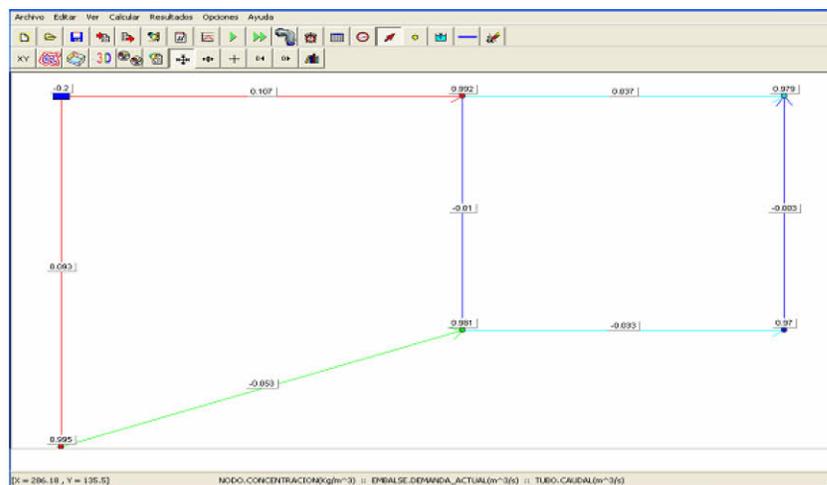


Figura 16 Cálculo de la Concentración (Kg/m^3) en los nodos.

Para el cálculo de la edad del agua en los nodos se sigue el mismo procedimiento que para el cálculo de concentraciones. La edad en el embalse puede ser diferente a cero, para simular tanques de almacenamiento, pero en este caso el valor de la edad es cero.

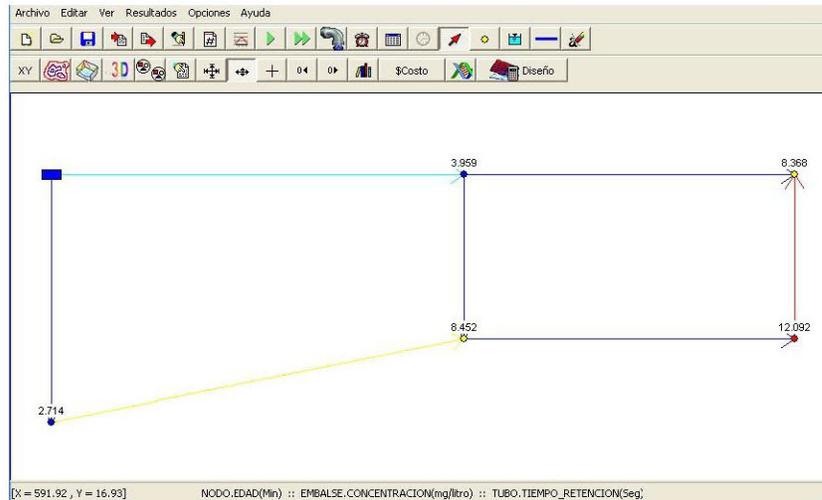


Figura 17 Cálculo de la Edad (minutos) en los nodos.

6. Conclusiones

El algoritmo recorre los nodos solo una vez, mientras que otros métodos los recorren muchas veces haciendo que este tipo de cálculos sean muy demorados.

El algoritmo no consume mucha memoria porque es iterativo y NO requiere guardar todas las instancias del proceso de cálculo simultáneamente.

El algoritmo ARI permite el cálculo químico, de tiempos de retención, trazadores conservativos y porcentajes de procedencia de manera instantánea

El algoritmo ARI es un poco más complejo pero si se conoce se puede implementar rápidamente.

El algoritmo es muy eficiente y puede ser aplicado en la modelación de la calidad de agua en período dinámico, para reducir los tiempos de cálculo y el uso de la memoria de computador.

La modelación de la calidad de agua en período estático es importante para conocer como reacciona una sustancia a lo largo de la red.

Estos modelos en período estático no proveen una representación real de la operación actual del sistema y la transiente interacción de la calidad de agua y el comportamiento hidráulico, ya que los procesos que ocurren dentro de la distribución son generalmente continuos.

7. Referencias

L.M. Mays, Manual de Sistemas de Distribución de Agua. Mc Graw Hill, 2002, pp. 10.1-10.19.

J.G. Saldarriaga, Hidráulica de Tuberías. Mc Graw Hill, 2001, pp. 365-370.

L.A. Rossman, R.M. Clark, W.M. Grayman (1995, Enero). Modeling Chlorine Residuals in Drinking-Water Distribution Systems. Revista Journal of Environmental Engineering. [En Línea]. 120, (4).

R.M. Clark, L.A. Rossman, L.J. Wynner (1995, Diciembre). Modeling Distribution Systems Water Quality: Regulatory Implications. Revista Journal of Environmental Engineering. [En Línea].

M. A. Weiss. Estructuras de Datos en Java. Addison Wesley, 2000, pp.353-380.