

MODELOS DE REDES DE AGUA POTABLE ÚTILES PARA PROYECTOS DE SECTORIZACIÓN

Velitchko Tzatchkov¹, Víctor Hugo Alcocer Yamanaka¹, Víctor Javier Bourguett Ortiz²;

Resumen – Los proyectos de sectorización de redes de agua potable, en proceso en diferentes ciudades mexicanas actualmente, consisten en dividir la red de la ciudad en varias subredes o sectores más pequeños con una o máximo dos entradas de agua por sector. Para diseñar los sectores se emplean modelos de redes de agua potable, que revisan si la sectorización propuesta puede funcionar hidráulicamente de manera adecuada. Para los proyectos de sectorización en redes grandes se requieren sin embargo facilidades algorítmicas adicionales, como análisis de conectividad, zona de influencia y contribución de cada fuente sobre el consumo. En el presente artículo se discuten eficientes algoritmos de este tipo basados en la teoría de los grafos, implementados en un sistema de cómputo.

Abstract – Water distribution network sectorization projects, in process in different Mexican cities now, consist in dividing the large interconnected city distribution network in smaller networks with one (or two in exceptional cases) supply. Water distribution network models are routinely applied to revise any proposed sectorization. For large network sectorization projects, however, additional algorithmic capabilities are needed, such as connectivity and source contribution analysis. This paper presents algorithms of that type based on graph theory implemented in a computer system.

Palabras clave: Sectorización de redes, modelos de redes de distribución, sistemas de abastecimiento de agua, algoritmos sobre grafos.

Keywords: Sectorization of distribution networks, distribution networks models, water supply systems, algorithms on graphs.

¹ Especialista en Hidráulica – Instituto Mexicano de Tecnología del Agua – Coordinación de Hidráulica – Subcoordinador de Hidráulica Rural y Urbana – Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso – CP 62550 – Jiutepec, Mor. (México) – Tel: (+52) 777 3293600 – Fax: (+52) 777 3293678 E-mail: valcocer@tlaloc.imta.mx; velitchk@tlaloc.imta.mx

² Subcoordinador de Hidráulica Rural y Urbana – Instituto Mexicano de Tecnología del Agua – Coordinación de Hidráulica – Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso – CP 62550 – Jiutepec, Mor. (México) – Tel: (+52) 777 3293600 – Fax: (+52) 777 3293678 E-mail: vbougue@tlaloc.imta.mx

INTRODUCCIÓN

En muchas ciudades mexicanas se tienen ahora redes de agua potable grandes abastecidas por varias fuentes interconectadas entre si por medio de la propia red. En estas condiciones es difícil controlar el agua entregada y consumida, que es una condición indispensable para un diagnóstico y reducción de las pérdidas de agua. Por lo anterior, en las últimas dos décadas en México, la solución a este tipo de situaciones, ha sido la de *sectorizar* la red en cierto número de subredes separadas, con pocas o en el mejor de los casos, con una sola alimentación por sector, para poder medir el caudal que ingresa a cada uno de éstos, y área de influencia bien definida. Físicamente la sectorización se realiza cerrando válvulas, mediante cortes en ciertos tramos, o con la construcción de tuberías nuevas que permitan una mejor redistribución del flujo de la red. Para analizar las posibles alternativas de sectorización se requiere de la implementación de un modelo computacional que represente la situación actual de la red simulada (para fines de diagnóstico) y los posibles efectos de una sectorización u otras soluciones hidráulicas. En principio, los modelos de redes de agua potable conocidos, como por ejemplo Epanet, SARA, WaterCAD, y otros (Doe y Duncan 2003) pueden ser usados para llevar a cabo ese análisis, pero resultan insuficientes cuando las redes son grandes, por ejemplo de varios miles de nodos.

En redes pequeñas la sectorización puede ser revisada visualmente. En proyectos de sectorización en redes grandes resultan indispensables las siguientes facilidades adicionales del modelo computacional:

1. Obtener cuantas redes independientes (sectores) se tienen capturadas. Se entiende bajo red independiente una red que tiene su(s) propio(s) fuente(s), y no tiene conexión hidráulica con otra red.
2. Obtener los nodos en cada sector y su demanda.
3. Revisar si con las acciones propuestas de sectorización, como cierre de válvulas y corte de tuberías, no dejan alguna parte de la red de cualquier punto de suministro.
4. Definir el área de influencia de cada fuente, y la contribución de cada fuente sobre el consumo en cada nodo.

Las facilidades 1 y 3 resultan cruciales para detectar errores en los datos de la red, y errores en las acciones propuestas. En la Figura 1 se muestra una red en proyecto de sectorización, la red de distribución de la ciudad de San Luis Río Colorado (180,000 habitantes), en el estado de Sonora, México, digitalizada en el Sistema de Cómputo de Análisis y Diseño (SCADRED), que se describe más adelante en este artículo. Están tomadas en cuenta todas las tuberías de la red (de 3" para arriba). La red tiene 1,954 nodos y 2,706 tramos, está abastecida por 19 fuentes (pozos), y dividida en sectores por medio de cierre de válvulas y cortes de tubería. Resulta prácticamente imposible revisar errores en la sectorización propuesta, a no ser por medio de un algoritmo especial.

La facilidad 2 es esencial para realizar balances del agua en el sector, y la facilidad 4 es importante para definir la sectorización.

En este artículo se presentan algoritmos eficientes para esas cuatro facilidades, implementados en el SCADRED.

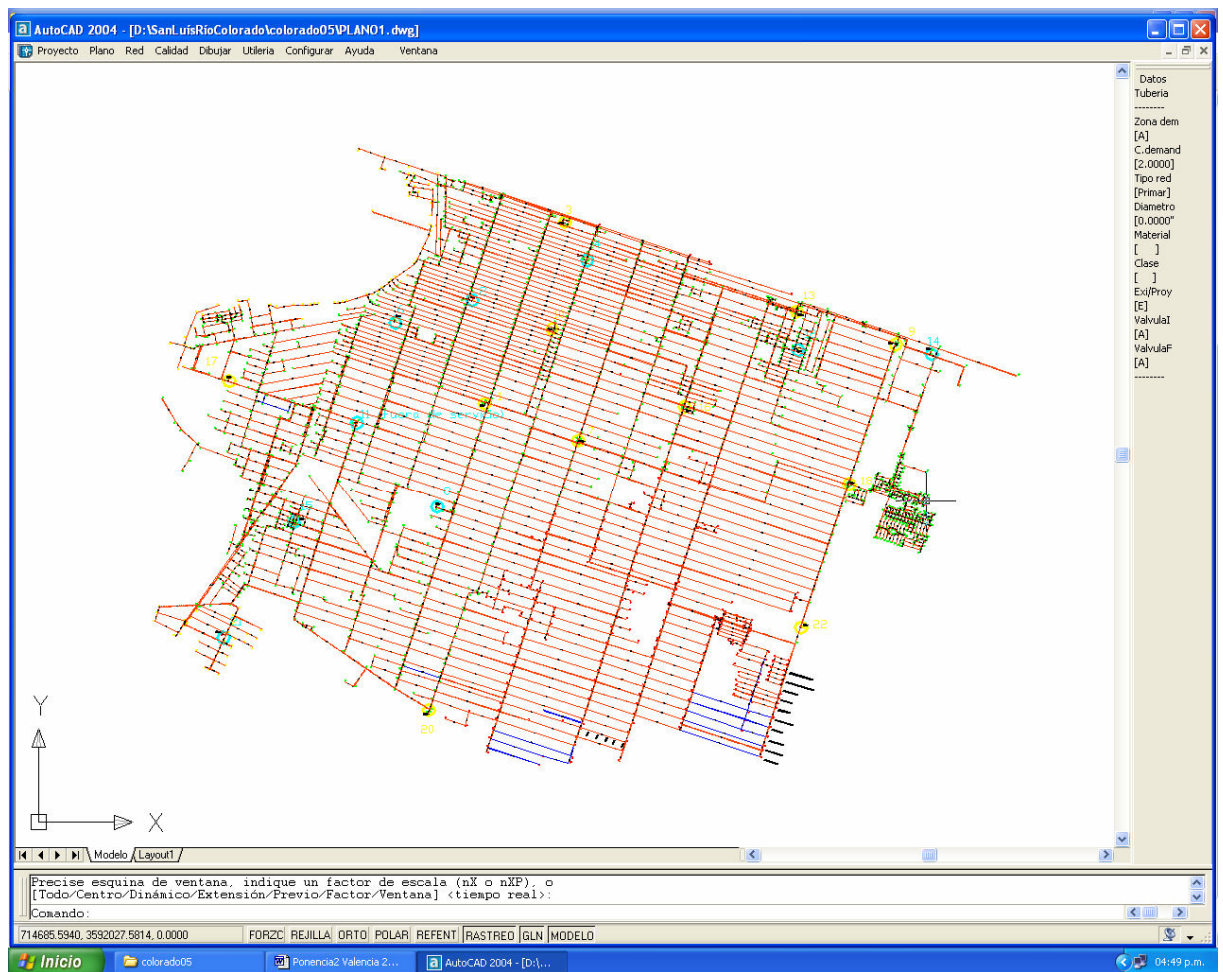


Figura 1 –Red de distribución completa de San Luís Río Colorado, estado de Sonora, México, digitalizada en SCADRED (1,954 nodos y 2,706 tramos)

TRABAJOS PREVIOS

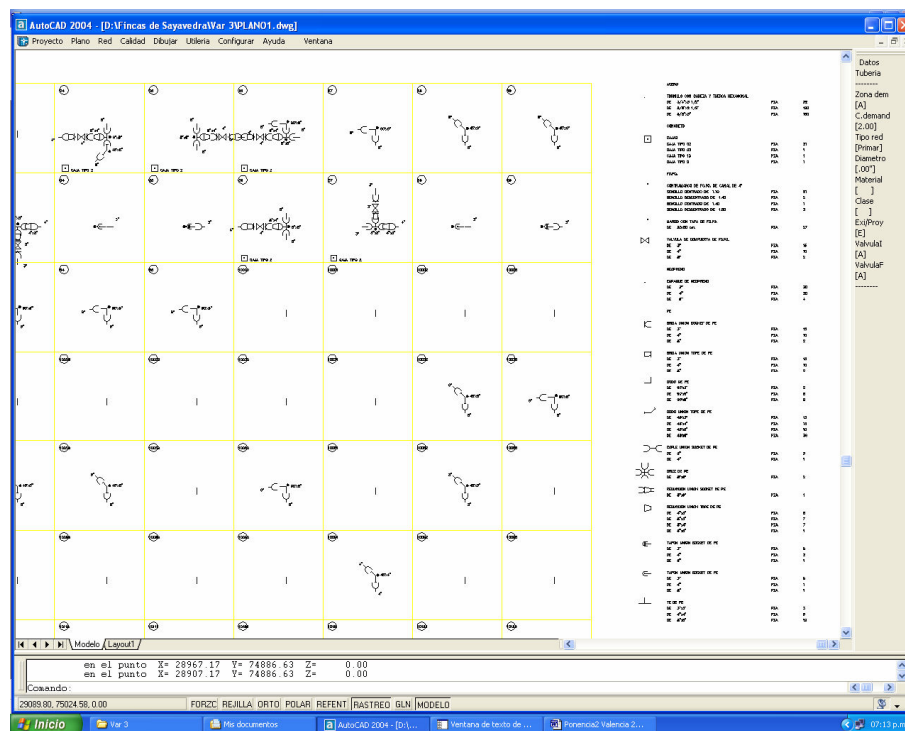
En parte, una solución de las necesidades planteadas en la Introducción de este artículo, puede ser dada por el análisis de calidad del agua con flujo permanente que algunos programas comerciales contienen. Como un ejemplo, para obtener la zona de influencia de una fuente dada bastaría con asignar una concentración ficticia de 100 unidades a esa fuente y una concentración igual a cero en las restantes, y correr un modelo de calidad del agua para la red con sustancia conservativa (no reactante). El conjunto de nodos para los cuales se obtendría una concentración diferente de cero en el resultado de ese análisis daría directamente la zona de influencia de la fuente. Repitiendo este proceso para cada fuente se puede obtener el porcentaje de contribución (influencia) de cada fuente sobre los nodos. Tzatchkov y Arreguín (1994) y Tzatchkov y Arreguín (1996) presentaron algoritmos de este tipo, que también obtienen el tiempo de residencia del agua en la red, y la concentración para sustancias no conservativas (reactantes). El proceso de cálculo que utilizan esos primeros algoritmos para ubicar los nodos vecinos de cada nodo es iterativo, por lo que funcionan bien para redes pequeñas, pero se vuelven muy lentos en redes grandes. Por esta razón se desarrollaron los algoritmos que se describen a continuación, con el uso de una memoria temporal llamada *pila* (*stack* en inglés), que son muy rápidos también en redes grandes.

EL SISTEMA DE CÓMPUTO DE ANÁLISIS Y DISEÑO DE REDES (SCADRED)

Es un sistema para el análisis y diseño de redes de agua potable, que corre dentro de AutoCAD, y tiene las siguientes facilidades:

1. Análisis de flujo permanente en la red. Se utiliza el método de Todini y Pilati (1987).
2. Análisis de flujo no permanente en la red, por medio de cambio consecutivo de estados de flujo permanente (el así llamado análisis de periodos extendidos).
3. Consideración en el análisis de la red de fugas y consumo, como función de la presión (Tzatchkov y Noda 2002).
4. Selección (diseño) de los diámetros de los tramos nuevos de la red, basado en un procedimiento de enumeración restringida.
5. Visualización de los resultados de los análisis hidráulicos por medio de curvas de nivel, superficie 3D, y coloreado.
6. Diseño automático de piezas especiales en los cruceros, para materiales hierro fundido con bridas, PVC y polietileno.
7. Cuantificación de cantidades de obra y piezas, y cálculo del presupuesto de la obra.

En Tzatchkov e Izurieta (1996) se describe una de las primeras versiones del SCADRED. La Figura 2 muestra cruceros armados de manera automática con el SCADRED, con la tabla de cuantificación de piezas correspondiente.



IMPLEMENTACIÓN ALGORÍTMICA DE UNA PILA

Las *pilas* son estructuras básicas, que se utilizan en muchos algoritmos computacionales. Una pila es una estructura dinámica de almacenamiento temporal de datos. Su objetivo es almacenar temporalmente cierto número de elementos, con la posibilidad de añadir nuevos elementos y extraer elementos almacenados, uno por uno. Un nuevo elemento puede ser añadido solamente al final de la pila, y extraído también del final. De esta manera, el último elemento que ingresó en la pila, es el primero en salir (esquema LIFO (“Last In, First Out”) en inglés).

Las *pilas* son fáciles de implementar en un programa de cómputo. Bastaría con declarar un arreglo de elementos, y un puntero (una variable de tipo entero) o *índice* que contenga la posición del último elemento almacenado. Para agregar un nuevo elemento a la pila se incrementa el valor del índice, y se almacena el nuevo elemento en la posición resultante (al final de la pila). Para extraer un elemento de la pila, se toma el elemento al cual apunta el índice, y se decrementa el valor del índice.

ALGORITMO PARA OBTENER LAS SUBREDES SEPARADAS

Para este análisis no se ocupa el sentido del flujo en las tuberías, por lo que éste se puede realizar antes del análisis hidráulico de gastos y presiones. En la terminología de la teoría de los grafos en este caso la red se maneja como un *grafo no dirigido*, que es conveniente representar con una lista en que para cada nodo se indican sus nodos vecinos. La determinación de las subredes se realiza de la manera siguiente:

1. Se declara un arreglo de tipo Booleano con dimensión igual a la cantidad de nodos en red. Este arreglo se usa para marcar los nodos visitados, por lo que puede nombrarse *Visitados()*.
2. A todos los elementos de *Visitados()* se les asigna valor “Falso” (es decir en el principio ningún nodo se encuentra visitado).
3. Se revisa el estado de los nodos (visitado o no) uno por uno. Si el nodo *i* no está visitado, se ejecuta la rutina *BP(i)* descrita al final de este algoritmo. Si el nodo ya está visitado se pasa a revisar el siguiente nodo.
4. En resultado de la ejecución de la rutina *BP(i)*, algunos nodos que no estaban visitados pasan a ser visitados. El conjunto de esos nodos forma una subred separada con *raíz* en el nodo *i*.

Rutina *BP(i)*, donde *i* indica el *nodo raíz* de la subred:

1. Se revisan los vecinos no visitados de *i*. Al detectar un vecino no visitado, éste se almacena en una pila y se declara visitado.
2. Se toma como nodo *i* el último nodo almacenado en la pila, y se repite el punto 1 de la rutina.
3. El proceso termina cuando se vacía la pila.

La rutina $BP(i)$ realiza lo que en la teoría de los grafos se conoce como una *Búsqueda en Profundidad* (de ahí el nombre BP), conocido en inglés como *depth first search*, por la razón de que el proceso avanza en profundidad (alejándose del nodo raíz). En la teoría de los grafos se muestra que en este algoritmo cada nodo se visita sólo una vez, por lo que es bastante rápido.

ALGORITMO PARA REVISAR NODOS DESCONECTADOS

Para este análisis no se ocupa el sentido del flujo en las tuberías, por lo que éste se puede realizar antes del análisis hidráulico de gastos y presiones. En la terminología de la teoría de los grafos en este caso la red se maneja como un *grafo no dirigido*, que para los fines del algoritmo que aquí se describe es conveniente representar con una lista en que para cada nodo se indican sus nodos vecinos. La determinación de las subredes se realiza de la manera siguiente:

1. Se declara un arreglo de tipo Booleano con dimensión igual a la cantidad de nodos en red. Este arreglo se usa para marcar los nodos visitados, por lo que puede nombrarse $Visitados()$.
2. A todos los elementos de $Visitados()$ se les asigna valor “Falso” (es decir en el principio ningún nodo se encuentra visitado).
3. Cada nodo en la red que puede servir como una fuente de abastecimiento (como un tanque o una bomba), se declara como visitado (es decir, se asigna valor “Verdadero” a cada elemento del arreglo $Visitados()$ que corresponde a un tanque o bomba).
4. Se revisa el estado de los nodos (visitado o no) uno por uno. Si el nodo i está visitado, se ejecuta la rutina $BA(i)$ descrita al final de este algoritmo. Si el nodo ya está visitado se pasa a revisar el siguiente nodo.
5. Los nodos que quedan no visitados después de concluir el punto 4, no están conectados a ninguna fuente (no les puede llegar el agua).

Rutina $BA(i)$, donde i indica el *nodo raíz* de la subred:

1. El nodo i se coloca en una pila.
2. Se toma el último nodo almacenado en la pila, y se revisan sus nodos vecinos. Cada nodo vecino no visitado se coloca en la pila, y se declara como visitado.
3. El proceso termina cuando se vacía la pila.

La rutina $BA(i)$ realiza lo que en la teoría de los grafos se conoce como una *Búsqueda en Amplitud* (de ahí el nombre BA), conocido en inglés como *breadth first search*, por la razón de que en el proceso primero se recorren todos los nodos vecinos del nodo en cuestión, antes de pasar a otro nodo no visitado. En la teoría de los grafos se muestra que en este algoritmo también cada nodo se visita sólo una vez, por lo que es bastante rápido.

ALGORITMO PARA DETERMINAR LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES AL CONSUMO EN LOS NODOS

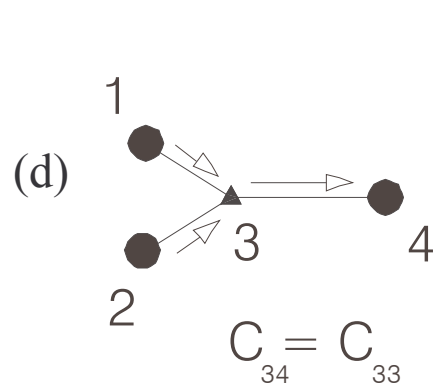
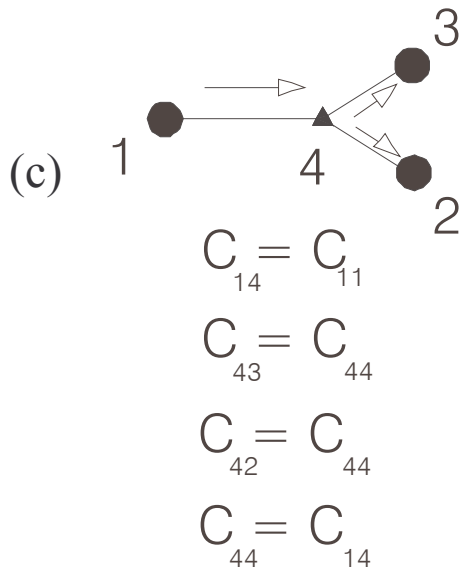
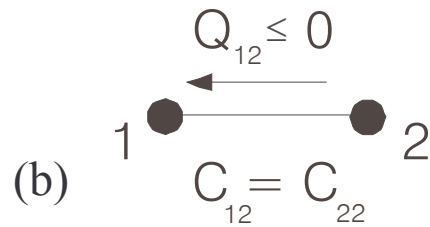
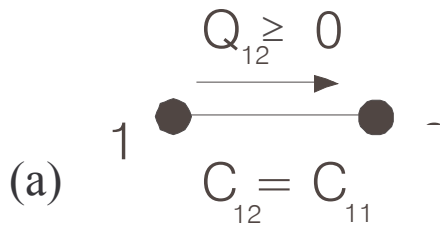
En este análisis se ocupa el sentido del flujo en las tuberías, por lo que éste se puede realizar apenas después de correr el análisis hidráulico de gastos y presiones. En la terminología de la teoría de los grafos en este caso la red se maneja como un *grafo dirigido*, que para los fines del algoritmo que aquí se describe es conveniente representar por dos listas. En la primera lista se indican, para cada nodo, cuáles son los nodos que introducen agua al nodo. En la segunda lista se indican, para cada nodo, cuáles son los nodos que reciben agua del nodo.

El algoritmo para determinar la contribución de una fuente al consumo en los nodos de la red se desprende del algoritmo de cálculo de la concentración de una sustancia química conservativa en los nodos de la red, dada su concentración en las fuentes de abastecimiento. Por esta razón se explica primero ese algoritmo. Los conceptos básicos se ilustran en la Figura 3.

Los dos números en los subíndices en la Figura 3 tienen el significado siguiente: Cuando los dos subíndices son iguales, por ejemplo C_{33} , se refiere a la concentración en un nodo (el nodo 3 en este caso). Cuando los dos subíndices son diferentes, por ejemplo C_{13} , se refieren a la concentración en el tramo definido por los dos nodos cuyos números representan los dos subíndices (nodos 1 y 3, y el tramo entre los nodos 1 y 3, en este caso). En un estado permanente, una sustancia conservativa no cambia su concentración a lo largo de una tubería, por lo que, como se muestra en la Figura 3, $C_{12}=C_{11}$ en la Figura 3-(a) y $C_{12}=C_{22}$ en la Figura 3-(b). En un nodo de distribución, como en la Figura 3-(c), los flujos que salen del nodo llevan la concentración que se tiene en el nodo. En un nodo de mezcla, como el nodo en la Figura 3-(d), el agua se mezcla en el nodo obteniéndose una nueva concentración, que llevarán los flujos que salen del nodo. Asumiendo una mezcla completa en el nodo, la concentración en los flujos salientes se calcula como:

$$C_{ii} = \frac{\sum_{j \in N_{in}} Q_j C_{ji}}{\sum_{j \in N_{in}} Q_j} \quad (1)$$

donde N_{in} indica el conjunto de nodos que introducen agua al nodo i . Los conceptos de representados en las Figuras 3-(a), (b), (c) y (d) se extienden fácilmente a nodos en los cuales se unen más de tres tuberías, como se muestra, por ejemplo, en las Figuras 3-(e) y 3-(f).



Nodo de distribución

Nodo de mezcla

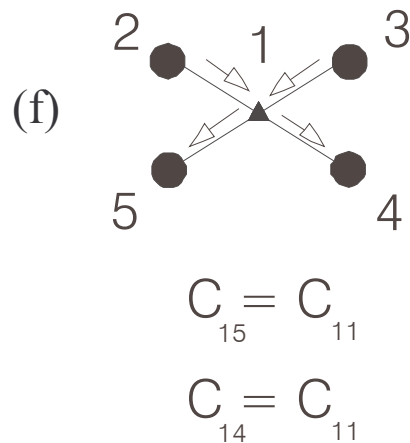
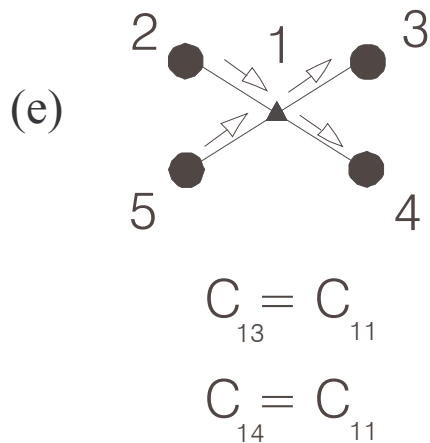


Figura 3 –Conceptos en el cálculo de la concentración de una sustancia conservativa en nodos de distribución y de mezcla en una red

Con esa base, la concentración de una sustancia conservativa en los nodos de una red, dada su concentración en las fuentes, se calcula por el algoritmo siguiente:

1. A los nodos que representan las fuentes se les asigna la concentración dada correspondiente.

2. Se revisa el estado (con concentración asignada o no) de los nodos uno por uno. Si el nodo i tiene concentración asignada se pasa al siguiente punto 2.1 de este algoritmo.
 - 2.1 El nodo i se coloca en una pila (será el primer nodo en la pila).
 - 2.2 Se extrae el último nodo almacenado en la pila. Sea éste el nodo j .
 - 2.3 Se revisa el estado de los nodos vecinos que reciben agua del nodo j uno por uno. Sea un nodo vecino de ese tipo k .
 - 2.4 Si el nodo k no tiene concentración asignada, la concentración del nodo j se asigna al tramo jk , y luego se revisa si tienen concentración asignada todos los tramos que introducen agua al nodo k . Si este es el caso, se calcula la concentración en el nodo k por la ecuación (1), y el nodo k se agrega a la pila.
 - 2.5 Se ejecuta nuevamente el punto 2.2 hasta que la pila quede vacía.
3. Al concluir el ciclo del punto 2 arriba, queda definida la concentración en todos los nodos de la red.

Ahora bien, como fue mencionado anteriormente para obtener la zona de influencia de una fuente se asigna una concentración ficticia de 100 unidades a esa fuente y una concentración igual a cero en las restantes fuentes, y se ejecuta el algoritmo así descrito. Se obtiene un valor de la supuesta concentración para cada nodo, que viene siendo el porcentaje de contribución de la fuente al consumo en el nodo. El SCADRED muestra ese resultado en dos formas: en forma de una tabla en un archivo de texto (Figura 4) y en forma gráfica en un diagrama tipo “pastel” (*pie chart* en inglés) con diferente color para cada fuente y letreros con el número de la fuente (Figura 5). En la Figura 6 se muestra una vista del resultado de contribución de las fuentes obtenido en el SCADRED para una red completa, permitiendo identificar enseguida las zonas de influencia de las fuentes, y visualizando con esto la eventual sectorización.

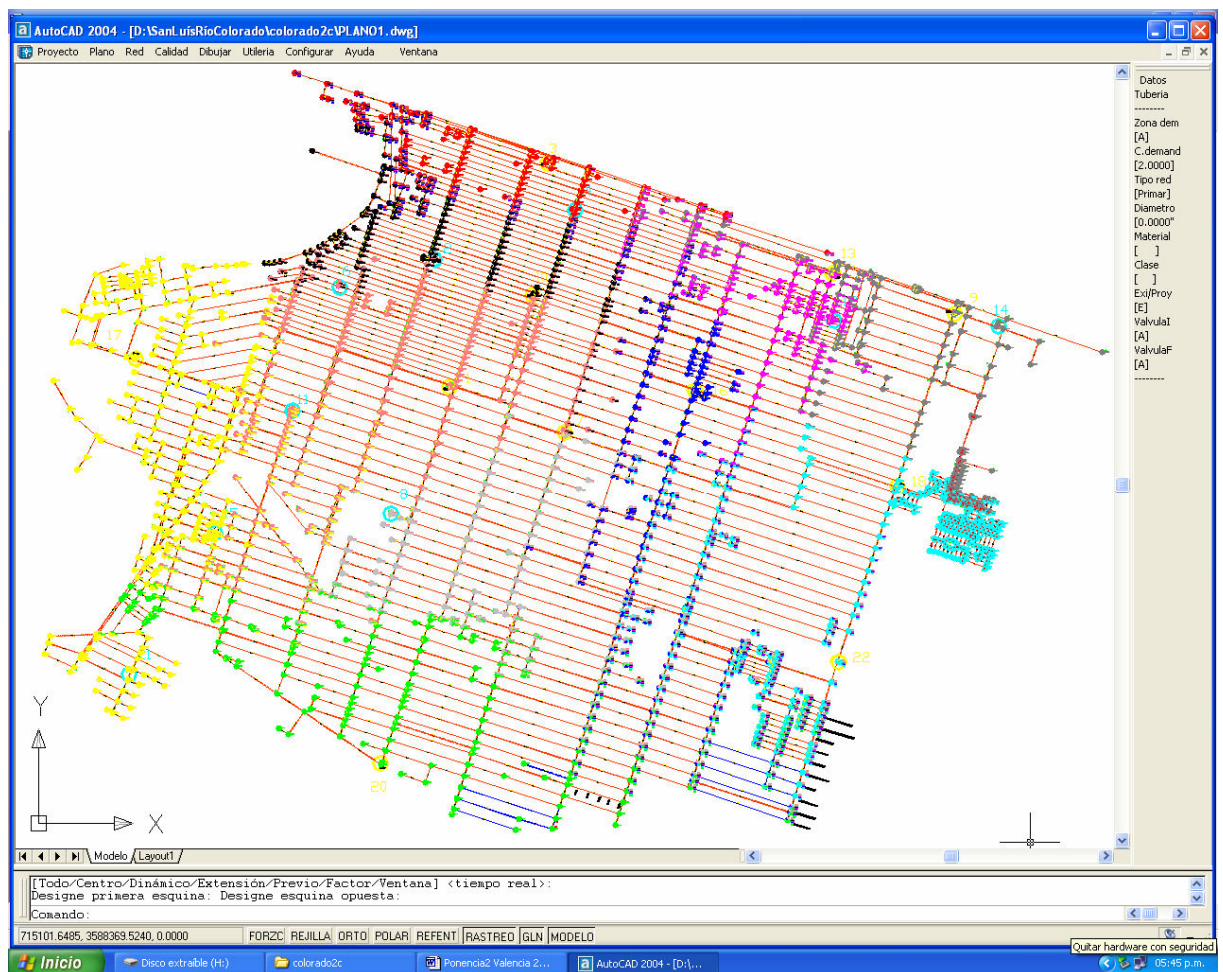


Figura 6 –Resultado de la contribución de las fuentes, visualizado en el SCADRED para una red completa. Se distinguen claramente por color las áreas de influencia de las fuentes.

CONCLUSIONES

Los proyectos de sectorización en redes grandes con varias fuentes interconectadas requieren facilidades algorítmicas adicionales, como análisis de conectividad, zona de influencia y contribución de las fuentes sobre el consumo. Esas facilidades normalmente no se tienen en los paquetes de análisis de redes de distribución de agua potable disponibles en el mercado. En el presente artículo se presentan algoritmos eficientes, basados en la teoría de los grafos, para obtener las subredes separadas, revisar para nodos desconectados de las fuentes, y determinar la contribución de las fuentes sobre el consumo en los nodos. Los algoritmos descritos están implementados en el Sistema de Cómputo de Análisis y Diseño (SCADRED) del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, con facilidades gráficas que permiten, entre otras facilidades, visualizar la contribución de las fuentes sobre el consumo en los nodos, y definir con esto sus áreas de influencia, algo que es de suma importancia en los proyectos de sectorización.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Doe, S. R.; Duncan, G. (2003), "*Water Informatics: State of the arts in the integration of water supply and geographic information systems*", Environmental Informatics Archives, Volume 1 (2003), 524-531.
- Todini, E.; Pilati, S. (1987), "*A gradient method for the analysis of pipe networks.*" International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution, Leicester Polytechnic, United Kingdom, September 1987.
- Tzatchkov, V.; Arreguín Cortés, F.I. (1994), "*Calidad del agua en redes de distribución de agua potable con flujo permanente*", XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Santiago, Chile, 7 a 11 de noviembre de 1994, p. 373-384.
- Tzatchkov, V.; Arreguín Cortés, F.I. (1996), "*Modelo de calidad del agua en redes de distribución con flujo permanente*", Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XI, núm. 1, enero-abril de 1996, p. 61-70.
- Tzatchkov, V.; Izurieta Dávila, J.L. (1996). "*Sistema de cómputo para el análisis y diseño óptimo de redes de distribución de agua potable*", Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XI, núm. 2, enero-abril de 1996, México, p. 55-63.
- Tzatchkov, V.; Noda Rojas, L.A. (2002), "*Modelación numérica de fugas y consumo en redes de agua potable*", XVII Congreso Nacional de Hidráulica, Monterrey, México, noviembre 2002, p. 327-332.