

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería de
Sistemas y Computación

Tesis de Maestría
Oscar José Cortés Rivero



Asesor: Silvia Takahashi

**MODELACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN
DE AGUA POTABLE EN PERÍODO EXTENDIDO**

Bogotá, Julio de 2007

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	4
2	OBJETIVOS	8
3	MODELACIÓN MATEMÁTICA	9
3.1	ECUACIONES	10
3.1.1	<i>Ecuaciones de Conservación de Masa:</i>	10
3.1.2	<i>Ecuaciones de Conservación de Energía</i>	11
3.2	MODELACIÓN DE ELEMENTOS.....	12
3.2.1	<i>Bombas</i>	12
3.2.2	<i>Nodos</i>	15
3.2.3	<i>Válvulas</i>	16
3.2.4	<i>Embalses</i>	17
3.2.5	<i>Tanques</i>	17
3.2.6	<i>Tubos</i>	18
3.3	MÉTODO DEL GRADIENTE	18
4	CALIDAD DE AGUA	21
4.1	FUNDAMENTOS DE LA CALIDAD DE AGUA	21
4.1.1	<i>Mezcla en las Uniones</i>	22
4.1.1.1	Mezcla en los nodos.....	22
4.1.1.2	Transporte Advectivo en las tuberías	23
4.1.1.3	Mezclas en Tanques.....	23
4.1.2	<i>Reacciones Cinéticas</i>	29
4.1.2.1	Reacciones en la masa de caudal	30
4.1.2.2	Reacciones de la pared de la tubería	30
4.1.2.3	Orden de las reacciones.....	30
4.2	MÉTODOS DE SOLUCIÓN	33
4.2.1	<i>Método de Elementos de Volúmenes Discretos</i>	33
4.2.2	<i>Método de las Diferencias Finitas:</i>	36
4.2.3	<i>Método Dirigido por Tiempo:</i>	37
4.2.4	<i>Método Dirigido por Evento</i>	38
5	DISEÑO MÓDULO CALIDAD DE AGUA	40
5.1	EQUIVALENCIA DE ALGORITMOS.....	40
5.1.1	<i>Método de Búsqueda Codicioso</i>	40
5.1.2	<i>Búsqueda Básica y Técnicas Transversales</i>	40
5.2	METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN	41
5.2.1	<i>Recorrido sin ordenamiento</i>	42
5.2.2	<i>Recorrido con ordenamiento</i>	43
5.3	BORRADOR DE ARQUITECTURA.....	44
5.4	ARQUITECTURA DEL MÓDULO CALIDAD DE AGUA	45
5.4.1	<i>Arquitectura del Programa Redes</i>	45
5.4.2	<i>Esquema General</i>	47
5.4.3	<i>Control de Tiempo Calidad</i>	48
5.4.4	<i>Manejador de Ecuaciones</i>	49
5.4.5	<i>Grafo Calidad de Agua</i>	50
5.4.6	<i>Método de Solución</i>	51
5.4.6.1	Lagrange Modificado	52
5.4.6.2	Lagrange Ordenamiento.....	53
6	LENGUAJE PROPÓSITO ESPECÍFICO	57
6.1	PATRONES DE DISEÑO	57
6.1.1	<i>Piggyback:</i>	58

6.1.2	<i>Pipeline</i>	58
6.1.3	<i>Procesamiento Léxico</i>	58
6.1.4	<i>Extensión del Lenguaje</i>	58
6.1.5	<i>Especialización del Lenguaje</i>	59
6.1.6	<i>Transformación de código a código</i>	59
6.1.7	<i>Representación de Estructuras de Datos</i>	59
6.1.8	<i>Sistema Front-end</i>	59
6.2	DISEÑO DEL LENGUAJE.....	60
6.2.1	<i>Lenguaje EPANET</i>	60
6.2.1.1	Control.....	60
6.2.2	<i>Lenguaje de Comandos</i>	61
6.2.2.1	Sintaxis.....	61
6.3	ARQUITECTURA DEL LENGUAJE.....	62
6.4	ALCANCE DEL LENGUAJE.....	62
6.5	GRAMÁTICA DEL LENGUAJE.....	63
7	RESULTADOS	65
7.1	PEQUEÑA RED DE DISTRIBUCIÓN.....	65
7.2	R28.....	67
7.3	RED R28 CON TANQUE.....	69
7.3.1	<i>Un solo compartimiento</i>	71
7.3.2	<i>Dos compartimientos</i>	72
7.4	GINEBRA.....	73
7.5	TIEMPOS DE EJECUCIÓN.....	75
8	CONCLUSIONES	77
9	BIBLIOGRAFÍA	80

1 Introducción

La búsqueda de agua potable para el consumo humano ha venido y continúa atrayendo mayor interés de las entidades públicas sanitarias y de salud, y de los operadores encargados del tratamiento de agua. Presentándose mayor interés y preocupación por el control del estado del agua cuando deja la planta de tratamiento, que por la variabilidad de su calidad desde la planta hasta su destino final. Esta situación es desafortunada debido a que la calidad del agua tratada puede deteriorarse a través de complejas transformaciones biológicas, químicas y físicas que ocurren dentro del sistema de distribución.

Para esto se requiere entendimiento de los factores que causan el deterioro del agua, ejemplos de estos factores son sistemas de bombeo funcionando por ciertos períodos durante el día, contaminación por cruces de conexiones de tubos, fugas y fallas del sistema, mezcla de agua de fuentes de diferentes calidades (concentraciones), pérdida del desinfectante residual en tanques de almacenamiento con largos tiempos de residencia, crecimiento de bacterias, corrosión de tubos y la formación de productos secundarios del desinfectante, que en algunos casos pueden ser cancerígenos.

La importancia de la observación de la variabilidad de la calidad de agua en los sistemas de distribución se ha aumentado a raíz de la aparición de epidemias de enfermedades como el cólera a principios de los 90, en los países de Perú, Chile, Colombia, Ecuador, Brasil, México y en menor medida en Estados Unidos. En el mayor de los casos de estas epidemias se debió a la mala operación y pobre mantenimiento de los sistemas de distribución¹. A raíz de estos incidentes se ha aumentado las regulaciones gubernamentales y las expectativas del usuario final referentes a la calidad de agua que viaja en las redes de distribución.

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA, por su sigla en inglés), recientemente ha establecido nuevas normas y leyes que establecen niveles de contaminantes máximos o niveles de acción para un número de parámetros de calidad de agua críticos asociados con efectos adversos a la salud para las redes de acueducto. Con esto se busca un constante monitoreo de los requerimientos de la calidad de agua, así como también de los niveles máximos de contaminantes, implementaciones de técnicas específicas de tratamiento, reemplazo de líneas principales de tuberías en los sistemas de distribución, entre otros.

¹U.S. Environmental Protection Agency. USEPA. www.epa.gov

La operación y manejo en la actualidad de sistemas de distribución de agua potable necesitan de modelos de simulación que permitan predecir las variaciones dinámicas de la calidad de agua dentro del ambiente del sistema de distribución. Con base en estos modelos se pueden diseñar programas de recolección de muestras de agua, optimizar los procesos de desinfección, evaluación de los aspectos de calidad de agua en el sistema de distribución y proyectos de mejoras en el almacenamiento de los embalses. En la parte económica, se tendrían ahorros en el costo total de desinfectante, optimizando la localización de estaciones de desinfección, reduciendo el consumo de esta sustancia.

Algunas aproximaciones para modelar matemáticamente en computadores el transporte y la disolución de sustancias en los sistemas de distribución han sido desarrolladas para período estático y para período dinámico. Para lo cual se debe asumir moviendo en una sola dirección (moviendo 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.

La modelación en período estático usa leyes de conservación de masa para determinar la distribución espacial de las sustancias disueltas bajo condiciones hidráulicas estáticas. Estos métodos solamente proveen una intermitente predicción de las variaciones de la calidad de agua.

La modelación dinámica se basa en sistemas de simulación para determinar el movimiento y el esparcimiento de sustancias bajo demandas, suministros y condiciones hidráulicas que varían con el tiempo. Estos modelos proveen una representación más precisa y 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.

Los modelos dinámicos pueden ser clasificados espacialmente como Eulerianos o Lagrangianos y temporalmente como dirigidos por tiempo o dirigidos por evento. Los modelos Eulerianos dividen las tuberías en una serie de volúmenes fijos e interconectados de control y almacenan los cambios en los límites (los nodos). Los modelos Lagrangianos rastrean los cambios en una serie de segmentos discretos de agua mientras ellos viajan por la red de tuberías. La simulación dirigida por eventos actualiza el estado de la red en intervalos fijos de tiempo. Las simulaciones dirigidas por eventos actualiza el estado del sistema únicamente cuando un cambio ocurre².

² Rossman, L. Boulos, P. *Numerical Methods for Modeling Water Quality in Distribution Systems: A Comparison*. 1996. Journal of water resources planning and management.

En esta investigación se desarrolla un módulo de simulación de la calidad de agua en período dinámico implementado en el lenguaje de propósito general Delphi 6.0 para el programa REDES, desarrollado en el Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de Los Andes (CICUA). Los resultados obtenidos de correr la simulación de calidad de agua para varias redes de distribución de agua potable se validaron con el programa EPANET y con mediciones de campo de concentraciones de cloro residual realizadas sobre redes de acueducto.

El módulo de simulación de calidad de agua en período dinámico conserva las características de velocidad presentes en algoritmos desarrollados en otros programas, pero a la vez ofrece una gran flexibilidad, separando la implementación de cada componente perteneciente al módulo. Se desarrolla un lenguaje de propósito específico para la representación de ecuaciones que describan el comportamiento de variación de la concentración de sustancias que puedan estar presentes en la distribución de agua potable. Se crea un nuevo servicio en la modelación de calidad de agua, que consiste en ofrecer la posibilidad de modelar simultáneamente hasta cuatro diferentes sustancias.

El resto de este documento se encuentra organizado así:

El capítulo 2 contiene los objetivos de la tesis, explicando lo que se quiere lograr con el trabajo desarrollado.

El capítulo 3 es la descripción de las ecuaciones y la modelación matemática de las redes de distribución de agua potable, con el objetivo de realizar la simulación hidráulica de la red.

El capítulo 4 es la base teórica del documento y se explica en detalle cada una de las implicaciones que se deben tener en cuenta en la modelación de la calidad de agua.

El capítulo 5 presenta la propuesta de solución a la modelación de la calidad de agua en período extendido.

El capítulo 6 contiene la descripción del lenguaje de propósito específico desarrollado para el programa REDES, haciendo énfasis en la parte de calidad de agua.

El capítulo 7 recopila los resultados de las pruebas realizadas de los diferentes casos que se pueden presentar en un sistema de distribución.

En el capítulo 8 están las conclusiones de esta investigación con algunas recomendaciones. En el capítulo 8 están las referencias bibliográficas más relevantes utilizadas en el desarrollo de la tesis.

2 Objetivos

- Modelación de la Calidad de Agua para varias sustancias reactivas como no reactivas en forma simultánea.
- Alcanzar gran velocidad en la Ejecución en la Modelación de la Calidad de Agua y Tiempos de Ejecución Inferiores a los obtenidos en otros programas en la Modelación de la Calidad de Agua para varias sustancias.
- Lenguaje de Propósito Específico que permita cambiar el estado de los elementos de la red en tiempo de ejecución del cálculo hidráulico y calidad de agua.
- Diseño e implementación del módulo de Calidad de Agua con flexibilidad y extensibilidad.

3 Modelación Matemática

En este capítulo se realiza una breve descripción de los elementos de un sistema de distribución de agua potable que influyen en la simulación hidráulica de la red, en especial el sentido y magnitud del caudal transportado en los tubos. En la descripción de cada elemento de la red se hace énfasis en el impacto que tienen sobre la calidad de agua en un lapso de tiempo.

Los Sistemas de Distribución de Agua Potable son grafos acíclicos dirigidos cuyos arcos representan los tubos, válvulas y bombas presentes en la red. Las uniones del grafo son los embalses, tanques y nodos de demanda. Cada tipo de arco tiene propiedades que influyen en el costo del transporte o flujo de agua de un nodo a otro.

El embalse o planta de tratamiento provee al sistema de distribución con la cantidad y con la calidad establecida, el agua necesaria para las actividades domésticas e industriales de los usuarios de la red. En la mayoría de los casos la energía (presión) con la que es suministrada el agua potable no es suficiente para vencer las pérdidas por fricción, las diferencias de alturas y las pérdidas menores debidas a accesorios en la red como codos, válvulas, reducciones o ampliaciones en los diámetros de tuberías contiguas. En consecuencia, la inclusión de bombas es obligatoria para poder satisfacer las demandas de los usuarios con una presión adecuada (dicha presión debe ser mayor a la mínima establecida por norma según las entidades regionales encargadas de la regulación y control de la distribución de agua), la selección y el análisis de la bomba se presentará más adelante.

Los tanques de almacenamiento aportan mayor confiabilidad en el servicio y el funcionamiento del sistema de distribución ante el acontecimiento de emergencias y mantenimientos de la red, a la vez que reduce costos de energía en la operación de las bombas. Las válvulas son accesorios para la regulación de caudal, presión y sentido del flujo del agua, que permiten el control y operación de la red. Las tuberías son el medio por donde se transporta el agua en la red y se entrega a cada usuario. Los nodos representan varios usuarios de la red de distribución y tienen asignadas las demandas de dichos usuarios, es decir, son los puntos de la red donde se extrae el agua. Un esquema de un sistema de distribución de agua potable se presenta a continuación:

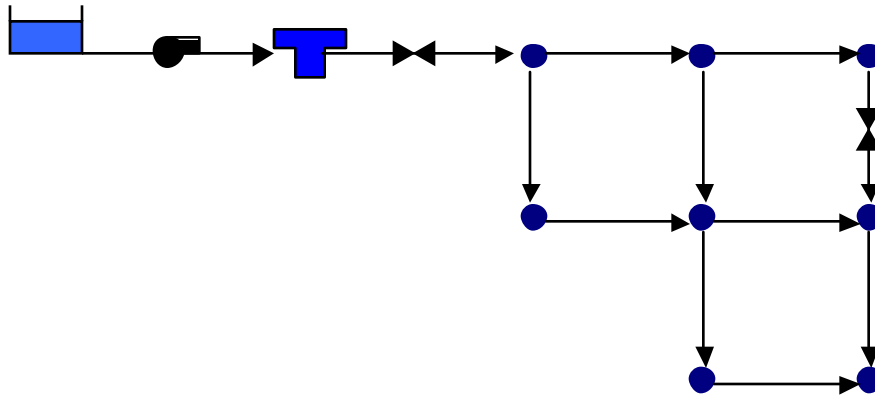


Figura 1 Esquema de una red de distribución de agua potable

Para conocer los caudales en los tubos y las presiones en los nodos de la red de distribución de agua, es necesario calcular la hidráulica de la red, basándose en las ecuaciones de conservación de masa y conservación de energía.

3.1 Ecuaciones

3.1.1 Ecuaciones de Conservación de Masa:

En cada nodo de la red se presenta conservación de masa, es decir, la suma de caudales que ingresa a cada nodo es igual al caudal de salida más el caudal extraído de la red en ese nodo. A continuación se presenta la ecuación de conservación de masa para cada nodo:

$$\sum_{j \in J} Q_{in} = \sum_{i \in I} Q_{out} + Q_d$$

Ecuación 1

dónde, Q_{in} es el caudal de entrada, el índice j representa el caudal proveniente de cada tubo que llega al nodo, Q_{out} es el caudal de salida, el índice i es el caudal de cada tubo que sale del nodo, y Q_d es el caudal demandado en el nodo.

En los tanques la conservación de masa se presenta en la variación del volumen de agua almacenada en un período de tiempo Δt . El volumen aumenta o disminuye de acuerdo con la diferencia entre el caudal de entrada y salida en un período de tiempo.

$$\Delta V = (Q_{in} - Q_{out}) \cdot \Delta t$$

Ecuación 2

En los embalses se presenta la misma conservación de masa que en los tanques, pero el volumen de agua no cambia, debido a que se supone que el volumen de agua de los embalses es infinito.

3.1.2 Ecuaciones de Conservación de Energía

El principio de conservación de energía establece que la diferencia de energía entre dos puntos es igual a las pérdidas por fricción y pérdidas menores. Para el cálculo de las pérdidas por fricción se utiliza la ecuación de Darcy-Weisbach en conjunto con la ecuación del factor de fricción de Coolebrook-White.

$$h_f = f \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 3

El factor de fricción f se calcula con la ecuación de Coolebrook-White para flujo turbulento, donde el número de Reynolds es mayor a 2000. Esta ecuación es implícita porque lo que su resolución es de manera iterativa.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{k_s}{3.7 \cdot d} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right)$$

Ecuación 4

El número de Reynolds es un factor adimensional que relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas, y se define de la siguiente manera para tuberías circulares:

$$\text{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu}$$

Ecuación 5

dónde v es la velocidad promedio en el tubo, d es el diámetro del tubo y ν es la viscosidad cinemática del fluido.

Para flujo laminar con número de Reynolds menor a 2000, el factor de fricción f se calcula de la siguiente forma:

$$f = \frac{64}{\text{Re}}$$

Ecuación 6

El cálculo de las pérdidas menores requiere el conocimiento de la suma de los coeficientes de pérdidas menores de todos los accesorios que contenga el tubo, y la ecuación con la que se describe estas pérdidas es la siguiente:

$$h_m = \sum k_m \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 7

En las bombas la diferencia de energía entre el punto inicial y final es igual a las pérdidas por fricción y las pérdidas menores menos la energía añadida por la bomba.

3.2 Modelación de Elementos

3.2.1 Bombas

Las bombas son elementos en la red que inyectan energía al flujo para transportar mayor caudal con una presión adecuada a cada uno de los nodos del sistema de distribución. Por este motivo la presencia de bombas en sistemas de tuberías afecta las líneas de energía y de gradiente hidráulico del flujo, debido a que son máquinas cinéticas que transforman la energía mecánica en energía hidráulica por medio de rotación o acción centrífuga sobre el fluido.

La importancia de las bombas en la calidad de agua, radica en que su operación no puede ser continua debido a costos surgidos en el consumo de energía eléctrica, por lo que hace necesario contar con tanques de almacenamiento, en donde se pueda bombear durante un lapso de tiempo la cantidad de agua requerida en el día. El ahorro en energía eléctrica se debe a que la operación de la bomba se realiza en el punto en el cual la energía suministrada por la bomba es igual a la energía consumida por fricción o pérdidas menores del sistema de tuberías para un caudal deseado. Para encontrar este punto de operación se debe construir la curva de caudal por altura piezométrica de la bomba y la curva de caudal por altura piezométrica del sistema de tuberías.

1. Curva de la Bomba

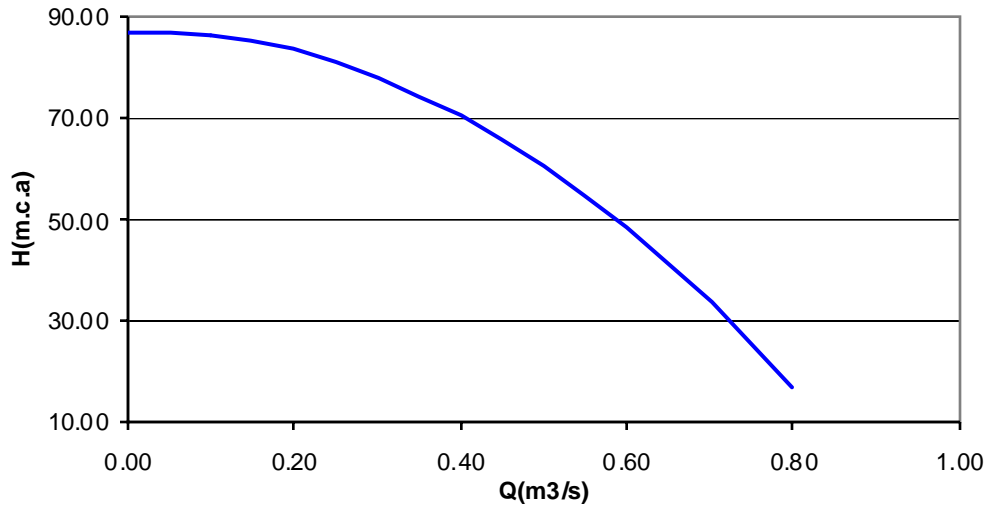


Figura 2 Curva de la Bomba

Esta curva es suministrada por el fabricante de la bomba y tiene forma parabólica, por lo que la ecuación que describe su comportamiento puede ser estimada conociendo 3 pares de valores de altura piezométrica por caudal, y tiene la siguiente estructura:

$$H_b = A \cdot Q^2 + B \cdot Q + C$$

Ecuación 8

2. Curva del Sistema

La curva del sistema describe la relación entre el caudal en una tubería y las pérdidas de energía producidas. Los elementos esenciales de la curva de un sistema incluyen:

- La diferencia entre las elevaciones del embalse de donde se bombea el agua y del tanque a donde se bombea el agua.
- Las pérdidas de energía por fricción y por pérdidas menores.

La ecuación de la curva del sistema que tiene en cuenta los elementos anteriormente descritos es la siguiente:

$$H_s = H_T + \left(\sum f_i \frac{l_i}{d} + \sum k_m \right) \cdot \frac{Q^2}{2gA}$$

Ecuación 9

A continuación se presenta la ilustración de la forma que tiene la curva del sistema

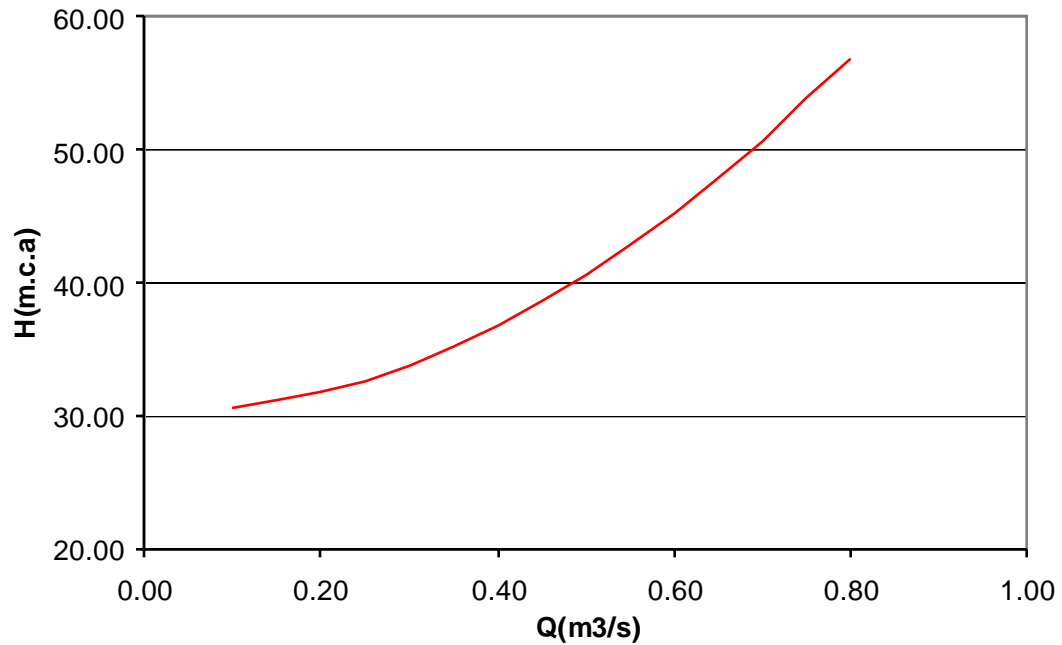


Figura 3 Curva del Sistema

3. Punto de Operación

El punto de operación de la bomba es el punto donde se intersectan la curva de la bomba y la curva del sistema.

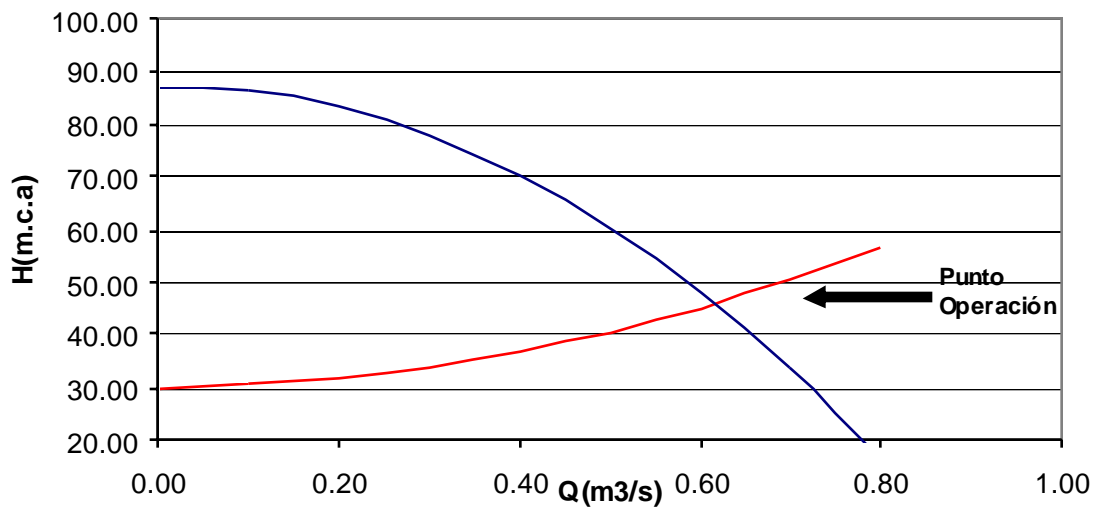


Figura 4 Punto Operación de la Bomba.

Operar la bomba bajo un caudal diferente al caudal del punto de operación implicaría para un caudal inferior proporcionar una altura superior a la altura necesaria para transportar ese caudal desde el punto de toma de caudal hasta

el punto de descarga del caudal, por lo que se desperdiciaría parte de la energía añadida al flujo por la bomba, y en algunos casos sería necesario la utilización de válvulas que redujeran la presión. En el caso donde el caudal fuera superior al caudal del punto de operación, se necesitaría que la bomba le proporcionara mayor energía al flujo, puesto que la energía necesaria para vencer la diferencia de elevaciones, las pérdidas por fricción y las pérdidas menores es mayor a la requerida en el punto de operación. Por estas razones, las bombas siempre operan bajo un caudal constante y la diferencia entre la oferta de caudal y la demanda de caudal se almacenan en un tanque, para después suplir las demandas de los usuarios de la red, una vez la bomba haya dejado de operar en el día.

Los sistemas de distribución de agua se controlan para satisfacer varios objetivos, incluyendo rendimiento hidráulico y eficiencia económica. La eficiencia económica está influida por factores tales como coste general de operación y mantenimiento y coste de bombeo. En los sistemas convencionales, el bombeo del agua tratada representa la mayor parte del presupuesto total energético. Por ello se crea un conjunto de reglas que indique cuando una bomba en particular o un grupo de bombas debería ser conectada o desconectada en un período de tiempo determinado.

Actualmente se han desarrollado varios modelos de optimización para determinar el control óptimo de operación de las bombas en un sistema de distribución de agua para un horizonte temporal predefinido con un objetivo de calidad de agua y minimización de costes de bombeo. Estos modelos de optimización constan de varias funciones objetivos de calidad de agua, que consisten en minimización de las desviaciones de las concentraciones reales de cada constituyente de los valores de concentración deseados; minimización de los tiempos de operación totales de bombeo; y minimización del coste total de energía, cumpliendo con las restricciones para todos los períodos de tiempo las restricciones hidráulicas, de calidad de agua y los límites de contorno.

3.2.2 Nodos

Los nodos son las uniones de dos o más tubos, y tienen asignadas las demandas de varios usuarios de la red. Es en los nodos donde se extrae el caudal de la red de distribución de agua, y muy rara vez se presenta reversión del flujo, es decir, se presenta entrada de caudal a la red a través de algún nodo. En estos casos la calidad del agua se ve bastante afectada, porque el agua que entra a la red posee sustancias que pueden llegar a ser potenciales contaminantes o que en concentraciones altas puede afectar la salud de las personas. Adicionalmente la concentración de oro residual se encuentra en menor cantidad que la concentración que esta llegando al nodo.

Las demandas en los nodos no se mantienen constantes durante el día, por el contrario presentan grandes cambios que representan el consumo y el uso que le dan los usuarios al agua cada día. Estos cambios se presentan siguiendo un patrón, por lo cual se pueden asignar demandas bases a cada nodo y aplicar un patrón de multiplicadores que aumenten o disminuyan la demanda durante períodos específicos del día. Estos cambios de demandas en los nodos afectan en gran medida la calidad del agua, debido a que las demandas rigen la cantidad de caudal y el sentido del flujo en el que el agua viaja por los tubos. A continuación se presenta la ilustración de un patrón de consumo de una ciudad de Colombia.

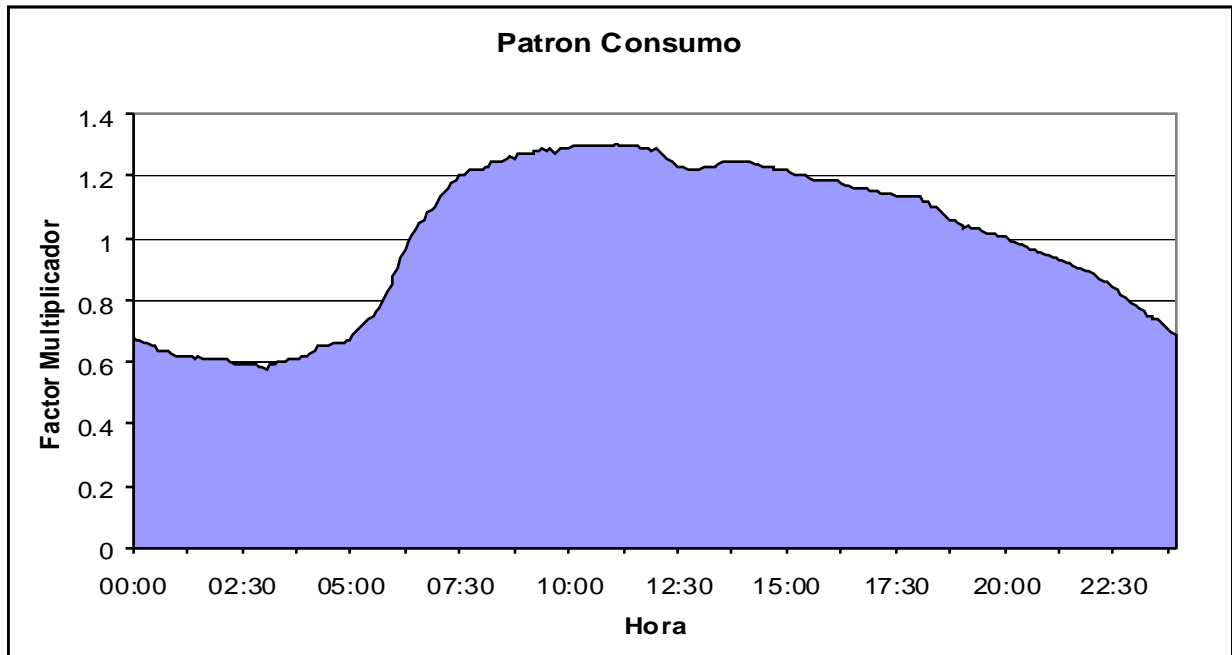


Figura 5 Patrón de Consumo de la Ciudad de Bucaramanga.

3.2.3 Válvulas

Las válvulas son accesorios que permiten controlar el comportamiento hidráulico de las redes de distribución de agua potable, al regular la presión, caudal y sentido del flujo del agua que pase dentro de ellas. De acuerdo con la función que realicen las válvulas se clasifican en:

- *Válvulas Reductoras de Presión:* su función es entregar una presión determinada a la salida de la válvula. La válvula produce pérdidas de energía con el fin de disminuir la presión de salida. No puede entregar una presión mayor a la de entrada.
- *Válvulas Control de Caudal:* su función es solo dejar pasar un caudal determinado a través de la válvula, motivo por el cual la válvula se cierra parcialmente para producir las pérdidas de energía necesarias que

disminuyan el caudal hasta llegar al caudal deseado. No se puede entregar un mayor caudal a la salida de la válvula al caudal de entrada.

- *Válvulas Cheque:* su función es sólo permitir flujo en un solo sentido. Cuando el flujo se revierte la válvula se cierra impidiendo que se presente flujo en sentido contrario.

3.2.4 Embalses

Los embalses son elementos que tienen volúmenes de agua infinitos teóricamente, por lo que su nivel no se ve afectado al suministrar agua a la red de acueducto. Representan plantas de tratamiento, represas o pozos subterráneos de donde se obtiene el agua para ser distribuida. La calidad de agua de los embalses se mantiene constante durante todo el día, es decir, el rango de concentraciones de diversas sustancias como cloro residual, fluoruro y THM no presenta mayor variación debido a que se ejercen rigurosos controles sobre el agua que es suministrada a la red.

3.2.5 Tanques

Los sistemas de distribución de agua potable están diseñados para asegurar la confiabilidad hidráulica, que consiste en abastecer con la cantidad requerida de agua con presión de servicio superior o igual a la mínima, establecida de acuerdo con las normas vigentes de cada región, las demandas domésticas e industriales de los usuarios de la red de acueducto, a la vez que el caudal necesario para apagar incendios en caso de que se llegasen a presentar. Con el fin de lograr este objetivo se construyen tanques que almacenan grandes cantidades de agua para proporcionar un abastecimiento de agua bajo condiciones constantes, en consecuencia se aumentan los tiempos de residencia del agua, que generan un deterioro en la calidad de agua por el decaimiento del cloro residual y crecimiento de microorganismos.

El impacto que tienen los tanques de almacenamiento sobre la calidad de agua en la red es muy poco entendido, a pesar que estos son los componentes que están más a la vista en las redes de distribución de agua potable. Su comportamiento es muy similar a un reactor de cambios químicos y biológicos que deterioran la calidad de agua. Estudios realizados por Grayman y Clarl (1993) conducen que la calidad de agua se deteriora como resultado de largos tiempos de residencia del agua en tanques de almacenamiento. Estos estudios también resaltan la importancia de los diseños de los tanques, sus ubicaciones en la red y su operación sobre la calidad de agua. A continuación se presentará una descripción detallada de la modelación matemática que caracterizan las diferentes formas de

mezcla del agua considerando dos tipos de tanques. El primer tipo de tanque consiste en un tanque de solo entrada ó salida de agua, cuyo volumen aumenta o disminuye en un período de tiempo de acuerdo con las demandas de servicio de la red. El segundo tipo de tanque, son los tanques que se encuentran localizados entre la planta de tratamiento y la red de acueducto, donde se puede presentar entrada y salida de agua en un mismo período.

3.2.6 Tubos

Los tubos son los elementos de la red que se encargan de transportar el caudal de una unión a otra. Es en los tubos donde el agua pierde energía por pérdidas por fricción o pérdidas menores. Las pérdidas por fricción y pérdidas menores son proporcionales al cuadrado del caudal transportado en la tubería, y es inversamente proporcional al diámetro. Adicionalmente, en los tubos se presenta reacciones de crecimiento o decrecimiento de las sustancias disueltas en el agua de la red de distribución. Las reacciones que se presentan son reacciones de pared y reacciones en la masa de agua. En cuanto mayor sea la longitud de la tubería, mayor será el tiempo de reacción de la sustancia dentro de la tubería, de la misma manera que a menor caudal transportado, se presenta menor velocidad promedio, por lo que el tiempo de la sustancia dentro de la tubería es mayor.

3.3 Método del Gradiente

El método del gradiente es el método matemático más utilizado para la resolución de las ecuaciones hidráulicas de redes cerradas de acueducto. Por medio del método del gradiente se encuentran los caudales en todas las tuberías y las alturas piezométricas en los nodos. Este método se encuentra basado en las ecuaciones de conservación de masa en los nodos de la red y la ecuación de conservación de la energía en cada uno de los circuitos de ésta, todo esto es posible gracias a que se tiene flujo permanente en la red de acueducto.

- Ecuación de continuidad en cada nodo:

$$\sum_{j=1}^{NT_i} Q_{ij} - Q_{Di} + Q_{ei} = 0$$

Ecuación 10

dónde NT_i es el número de tubos que llegan al nodo i , Q_{ij} representa el caudal que pasa por la tubería ij hacia el nodo i desde el nodo j (Este caudal puede ser positivo si va hacia el nodo i o negativo si sale del nodo i). Q_{D_i} es la demanda en el nodo y Q_{e_i} es el caudal que ingresa a la red en ese nodo.

- La ecuación para expresar la relación entre el caudal y las pérdidas de energía (pérdidas por fricción y pérdidas menores) y tener la posibilidad de la existencia de bombas o válvulas en los tubos de la red, se presenta a continuación:

$$H = \alpha \cdot Q^n + \beta \cdot Q + \gamma$$

Ecuación 11

donde:

n = exponente que depende de la ecuación de fricción utilizada (2.0 para el caso de la ecuación de Darcy-Weisbach).

α, β, γ = parámetros característicos del tubo, la válvula y las bombas. Los factores β y γ sólo son necesarios para este último caso.

Las siguientes definiciones para el método del gradiente son tomados del libro de hidráulica de tuberías de Juan Saldarriaga:

NT = número de tuberías de la red.

NN = número de nodos con cabeza piezométrica desconocida.

[A12] = matriz de conectividad asociada a cada uno de los nodos de la red. Su dimensión es NT x NN con sólo dos elementos diferentes de cero en la i -ésima fila:

-1 en la columna correspondiente al nodo inicial del tramo i .

1 en la columna correspondiente al nodo final del tramo i .

NS = número de nodos de cabeza fija o conocida.

[A10] = matriz topológica tramo a nodo para los NS nodos de cabeza fija. Su dimensión es NT x NS con un valor igual a -1 en las filas correspondientes a los tramos conectados a nodos de cabeza fija.

Con las anteriores definiciones, la pérdida de cabeza en cada tramo de tubería que conecte dos nodos de la red es:

$$[A11][Q] + [A12][H] = -[A10][H_0]$$

Ecuación 12

donde:

[A11] = matriz diagonal de NT x NT definida como sigue:

$$\begin{vmatrix} \alpha_1 Q_1^{n-1} + \beta_1 + \frac{\gamma_1}{Q_1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \alpha_2 Q_2^{n-1} + \beta_2 + \frac{\gamma_2}{Q_2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3 Q_3^{n-1} + \beta_3 + \frac{\gamma_3}{Q_3} & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \alpha_{NT} Q_{NT}^{n-1} + \beta_{NT} + \frac{\gamma_{NT}}{Q_{NT}} \end{vmatrix}$$

Figura 6 Matriz con las características topológicas de cada tubo, válvula o bomba

[Q] = vector de caudales con dimensión NT x 1.

[H] = vector de cabezas piezométricas desconocidas con dimensión NN x 1.

[H₀] = vector de cabezas piezométricas fijas con dimensión NS x 1.

La ecuación de conservación de energía es la siguiente:

$$[A21][Q] = [q]$$

Ecuación 13

donde:

[A21] = matriz transpuesta de [A12]

[q] = vector de demanda en cada nodo de la red con dimensión NN x 1.

La Ecuación 12 y la Ecuación 13 se pueden expresar en forma matricial:

$$\begin{vmatrix} [A11] & [A12] \\ [A21] & [0] \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} [Q] \\ [H] \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -[A10][H_0] \\ [q] \end{vmatrix}$$

Ecuación 14

En la Ecuación 14 la parte superior corresponde a la relación Q contra H, y la parte inferior corresponde a la conservación de la masa en cada uno de los nodos. Como la parte superior es no lineal, la ecuación se tiene que resolver de forma iterativa.

4 Calidad de Agua

El objetivo de un sistema de distribución de agua potable es entregar suficientes cantidades de agua donde y cuando se necesita con un aceptable nivel de calidad. El agua que sale de la planta de tratamiento posee una calidad de agua excelente para el consumo humano; sin embargo a medida que el agua se mueve a través del sistema de distribución, ocurren transformaciones y deterioros de la calidad de agua tanto en el volumen de agua como por interacciones con la pared de las tuberías.

Los principales factores que afectan la calidad de agua en un sistema de distribución debido a que las tuberías e instalaciones de mantenimiento constituyen una red compleja de reactores químicos y biológicos son el funcionamiento interrumpido de las fuentes de suministro, contaminación a consecuencia de flujos revertidos hacia la red o a partir de juntas de tuberías con fugas, corrosión de las tuberías, pérdidas del desinfectante residual por reacciones con compuestos orgánicos o inorgánicos o en instalaciones de almacenamientos por largos tiempos de residencia.

El entendimiento del destino y la transformación de las sustancias disueltas en el agua es difícil que pueda realizarse con base a monitorizaciones o muestreos de la calidad de agua en diferentes puntos del sistema de distribución porque los caminos de flujo y tiempos de desplazamiento son muy variables a causa de la redundancia (circuitos y varios caminos en que el agua puede llegar a un mismo destino) de las redes y los cambios continuos del uso del agua en el espacio y en el tiempo, sumado al uso de instalaciones de almacenamiento que complican aún más el entendimiento.

El uso de modelos que expliquen el comportamiento de la calidad de agua en los sistemas de distribución se hace indispensable como herramienta de apoyo al monitoreo. Por medio de los modelos se puede tener una concepción de la fracción de agua originaria de una fuente en particular, la edad del agua en el sistema, la concentración de un compuesto trazador no reactivo, la concentración y tasa de pérdida de un desinfectante y la concentración y tasa de desarrollo de subproductos de desinfección.

4.1 Fundamentos de la Calidad de Agua

Un modelo de red de calidad del agua predice cómo la concentración de sustancias disueltas varía con el tiempo a través de la red bajo un conjunto conocido de condiciones hidráulicas y modelos de entrada de fuente. Las

ecuaciones que gobiernan la variación de las concentraciones en tiempo y espacio están basadas sobre los principios de conservación de masa acoplados a una cinética de reacción. En esta sección se tocarán los temas de mezclas en las uniones (nodos y tanques), el transporte de las sustancias en los tubos y las reacciones cinéticas que ocurren en las redes de tuberías.

4.1.1 Mezcla en las Uniones

4.1.1.1 Mezcla en los nodos

En los nodos que reciben entrada de caudal de dos o más tubos, se supone que la mezcla de los fluidos es completa e instantánea. De esta manera, la concentración de una sustancia disuelta en el agua que sale a través del nodo es el promedio ponderado de las concentraciones de las tuberías influyentes con respecto al caudal. Para un nodo específico k , se puede definir su concentración de la siguiente forma

$$C_{i|x=0} = \frac{\sum_{j \in I_k} Q_j C_{j|x=L_j} + Q_{k,ext} C_{k,ext}}{Q_j + Q_{k,ext}} \quad 3$$

Ecuación 15

donde i representa el índice de los tubos que salen del nodo k , I_k es el conjunto de tubos que llegan al nodo k , L_j es la longitud del tubo j , Q_j es el caudal en el tubo j , $C_{j|x=L_j}$ es la concentración al final del tubo j , $Q_{k,ext}$ es el caudal de la fuente externa entrando en la red a través del nodo k , y $C_{k,ext}$ es la concentración del caudal externo entrando en el nodo k .

Adicionalmente a la concentración del flujo entrando a la red a través del nodo k , se puede tener casos en donde se desee aumentar la concentración de la sustancia disuelta en uno o varios puntos de la red, como por ejemplo aumentar la concentración de desinfectante para reponer la pérdida de este en sectores de la red y obtener una concentración adecuada que garantice la calidad del agua; colocar algún trazador o modelar la intrusión de algún contaminante en la red. Para modelar este nuevo caso se adiciona un término a la Ecuación 15, que representa la concentración de la sustancia que se está inyectando en el nodo k y se describe a continuación

³ L.M. Mays, *Manual de Sistemas de Distribución de Agua*. Mc Graw Hill, 2002.

$$C_{i|x=0} = \frac{\sum_{j \in I_k} Q_j C_{j|x=I_j} + Q_{k,ext} C_{k,ext}}{Q_j + Q_{k,ext}} + C_{iny,k}^4$$

Ecuación 16

4.1.1.2 Transporte Advectivo en las tuberías

El transporte de las sustancias disueltas en el agua a través de la red de distribución está relacionada directamente con las velocidades de los flujos en las tuberías, por lo que se debe tener un previo conocimiento de la hidráulica de la red y un modelo hidráulico bien calibrado para realizar y evaluar un análisis de la calidad de agua..

En el transporte advectivo la sustancia disuelta en el agua se desplaza a lo largo de una tubería con la misma velocidad media del caudal movilizado a través de la tubería, a la vez que la sustancia va reaccionando (aumentando o disminuyendo) a una velocidad determinada. La dispersión longitudinal no es usualmente un mecanismo de transporte importante bajo las condiciones de flujo turbulento presente en la mayoría de las tuberías de la red. En flujo laminar la no uniformidad de la distribución de velocidad causa mezcla longitudinal o dispersión, es decir, entremezcla de las masas de las sustancias de los volúmenes de agua adyacentes que viajan por una tubería. La ecuación que describe el transporte advectivo es la siguiente:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -u_i \frac{\partial C_i}{\partial x} + r(C_i)$$

Ecuación 17

4.1.1.3 Mezclas en Tanques

En la modelación de los diferentes tipos de mezcla, el volumen de cada tanque se dividirá en uno o más compartimientos para simular las diferentes zonas de mezcla presentes dentro de cada tanque. Para cada tipo de tanque se analizará la mezcla que se presenta en un solo compartimiento (mezcla completa), dos compartimientos (zonas muertas) y varios compartimientos para flujo con compartimiento de no mezcla (FIFO o LIFO). A continuación se presenta ecuaciones del cambio de concentración que son comunes para las diferentes configuraciones en cada tanque.

⁴ L.M. Mays, *Manual de Sistemas de Distribución de Agua*. Mc Graw Hill, 2002.

$$\frac{d(C_T V_T)}{dt} = F * C$$

Ecuación 18

dónde F es el flujo de agua, y C es la concentración. Expandiendo el término izquierdo se obtiene la siguiente expresión

$$V_T \frac{dC_T}{dt} + C_T \frac{dV_T}{dt} = F * C$$

Ecuación 19

El cambio en el volumen de agua en el tanque es descrito por

$$\frac{dV_T}{dt} = F$$

Ecuación 20

4.1.1.3.1 Tanque Entrada/Salida

1. Un solo Compartimiento:

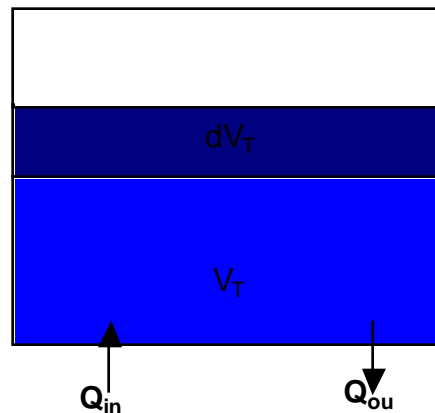


Figura 7 Representación de un Tanque con un solo compartimiento

En condiciones de entrada de agua se tiene una tasa de entrada Q_{in} con concentración de C_{in} . C_T es la concentración actual en el tanque y se tiene un volumen actual de agua V_T . Reemplazando F por Q_{in} , en la Ecuación 20,

y después en la Ecuación 19 se obtiene que el cambio de concentración en el tiempo para el período de entrada de caudal sea:

$$\frac{dC_T}{dt} = \frac{Q_{in}(C_{in} - C_T)}{V_T}$$

Ecuación 21

En condiciones de salida de agua a una tasa Q_{out} el cambio de concentración en el tiempo es cero.

2. Dos Compartimientos:

Se establece un volumen máximo para el compartimiento A, de manera que si el volumen total del tanque es menor, se presenta un comportamiento igual al anteriormente descrito.

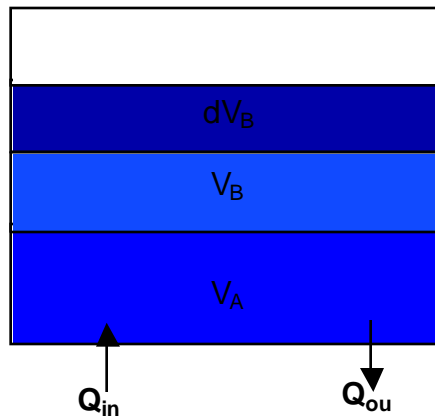


Figura 8 Representación de un Tanque con dos compartimientos

En condiciones de entrada el volumen del compartimiento A se mantiene fijo y solo varía el volumen del compartimiento B. El agua entra al compartimiento A con una tasa Q_{in} y con una concentración C_{in} . Se presenta entonces un flujo de agua del compartimiento A al compartimiento B con una tasa Q_{AB} , que en este caso es igual a Q_{in} . Las concentraciones en los compartimientos A y B son C_A y C_B respectivamente.

En el compartimiento A se tiene que el cambio de concentración en el tiempo es

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{Q_{in}(C_{in} - C_A)}{V_A}$$

Ecuación 22

En el compartimiento B se tiene que el cambio de concentración en el tiempo es

$$\frac{dC_B}{dt} = \frac{Q_{AB}(C_A - C_B)}{V_B}$$

Ecuación 23

En condiciones de salida el agua fluye del compartimiento B al compartimiento A con una tasa Q_{BA} que es igual a la tasa de salida Q_{out} . No ocurre cambio de concentración en compartimiento B. El cambio de concentración en el tiempo en el compartimiento A es

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{Q_{BA}(C_B - C_A)}{V_A}$$

Ecuación 24

3. Flujo con no mezcla

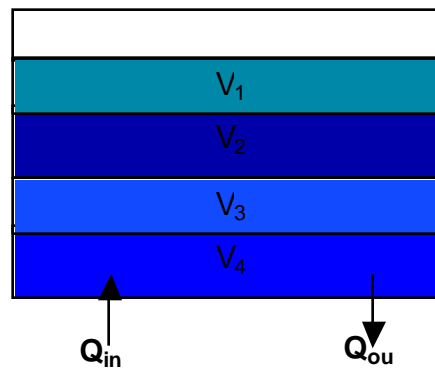


Figura 9 Representación de un Tanque con comportadito LIFO del flujo

El flujo es caracterizado por movimiento similar a un pistón, en el cual el fluido que entra al tanque no interactúa o se mezcla con el fluido previamente localizado en él. Esto ocurre porque la velocidad del fluido (agua) presenta líneas de corriente uniformes y no produce mezcla axial con los fluidos adyacentes. En consecuencia, se presenta un comportamiento oscilatorio en el cual el flujo primero entra al tanque durante el ciclo de llenado, desplaza el fluido residente más allá dentro del tanque sin que ocurra mezcla con los fluidos adyacentes; segundo, los volúmenes de agua sin interactuar salen del tanque durante el ciclo de

vaciado en orden inverso en el cual entraron, también sin presentarse mezcla entre ellos. De esta manera el último volumen de agua en entrar el tanque, es el primero en salir de él (LIFO por sus iniciales en inglés).

4.1.1.3.2 Tanque Flujo Transversal

1. Un solo Compartimiento:

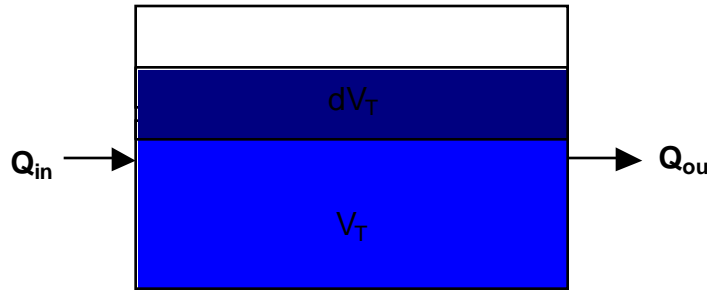


Figura 10 Representación de un Tanque con un solo compartimiento

En este caso el tanque está siendo llenado y siendo vaciado simultáneamente. Por lo tanto, el cambio de volumen con respecto al tiempo del tanque depende de la diferencia entre el caudal de entrada y el caudal de salida, de tal manera que la Ecuación 20 cambiaría

$$\frac{dV_T}{dt} = Q_{in} - Q_{out}$$

Ecuación 25

Reemplazando esta ecuación en la Ecuación 19, y realizando varios ajustes se obtiene la ecuación para el cambio de concentración de mezcla en este tipo de tanque con un solo compartimiento.

$$\frac{dC_T}{dt} = \frac{Q_{in}(C_{in} - C_T)}{V_T}$$

Ecuación 26

2. Dos Compartimientos:

Se establece un volumen máximo para el compartimiento A, de manera que si el volumen total del tanque es menor, se presenta un comportamiento igual al anteriormente descrito.

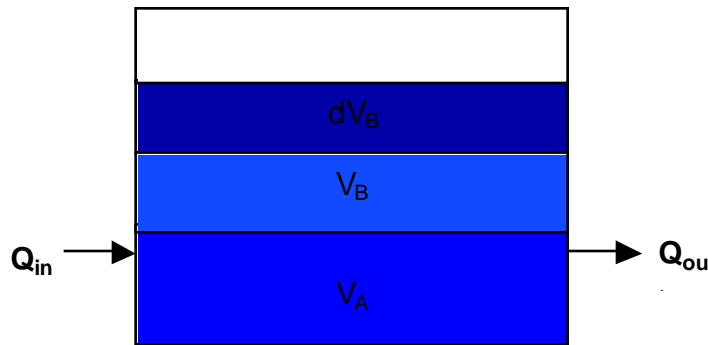


Figura 11 Representación de un Tanque con dos compartimientos

Solo se explicará el comportamiento en este modelo para condiciones de entrada y salida de flujo simultáneamente. Para casos en los cuales se presente solamente entrada o solamente salida de agua, su comportamiento es igual al descrito para tanques entrada/salida.

Si el caudal de entrada Q_{in} es mayor que el caudal de salida Q_{out} , entonces la ecuación que describe el cambio de concentración en la mezcla es igual a la del tanque entrada/salida, ya que se presenta flujo del compartimiento A al compartimiento B. El único cambio, ocurre en el caudal del compartimiento A al compartimiento B, que sería la diferencia entre el caudal de entrada y el caudal de salida.

$$Q_{AB} = Q_{in} - Q_{out}$$

Ecuación 27

Cuando el caudal de salida es mayor que el caudal de entrada se presenta flujo de caudal del compartimiento B al compartimiento, igual a la diferencia entre ellos.

$$Q_{BA} = Q_{out} - Q_{in}$$

Ecuación 28

Por este motivo el cambio de concentración en la mezcla del compartimiento A será afecta en medida por el caudal de entrada Q_{in} con concentración C_{in} y por el caudal Q_{BA} y concentración C_B , de manera que la ecuación queda de la siguiente manera.

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{Q_{in}(C_{in} - C_A)}{V_A} + \frac{Q_{BA}(C_B - C_A)}{V_A}$$

Ecuación 29

En el compartimiento B no se presenta cambio de concentración.

3. Flujo con no mezcla

El tanque en este modelo es representado por una serie finita de compartimientos cada uno siendo modelado individualmente. No se presenta esparramiento longitudinal ni se presenta flujo reverso de los compartimientos.

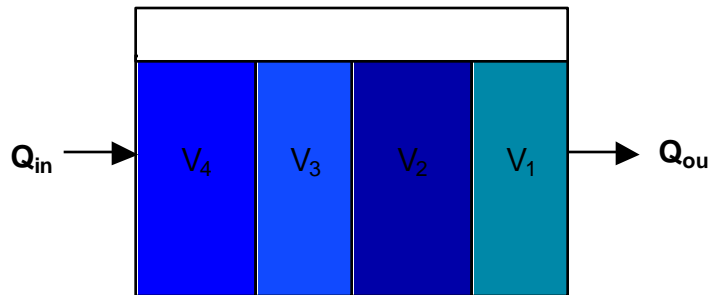


Figura 12 Representación de un Tanque con comportamiento FIFO del flujo

De esta manera el volumen que primero entra al tanque es el primero en salir sin presentarse interacción con los volúmenes adyacentes ni ninguna mezcla (FIFO por sus iniciales en inglés)

4.1.2 Reacciones Cinéticas

Las sustancias disueltas en el agua en el sistema de distribución reaccionan con la masa de caudal y con las paredes de las tuberías. Estas reacciones deben estar representadas mediante la ecuación de conservación de masa para la sustancia disuelta, que reacciona de acuerdo a diferentes tasas y relaciones con el medio donde se encuentran. Por ello, la cinética es utilizada para describir estas relaciones e incluir parámetros que relacionan la tasa de reacción con las condiciones del sistema.

Sustancias conservativas, como el fluoruro, no son reactivas. Mientras, sustancias como el cloro, reaccionan con otras sustancias disueltas en el agua y su cantidad se reduce en el sistema. La mayoría de los modelos supone que la tasa de reacción del cloro decrece exponencialmente con el tiempo y no está relacionada a la cantidad de cloro presente, considerándose así una reacción de primer orden. En algunos casos, debido a la disponibilidad de otra sustancia, la cantidad de una sustancia está limitada, ocurriendo una reacción de segundo orden.

4.1.2.1 Reacciones en la masa de caudal

Una sustancia puede reaccionar con los constituyentes presentes en el volumen de agua mientras se desplaza a través de la tubería o mientras se encuentra almacenada en el tanque de almacenamiento. La velocidad de reacción puede describirse como una función potencial de la concentración:

$$r = kC^n$$

Ecuación 30

donde k es la constante de la reacción y n es el orden de la reacción.

4.1.2.2 Reacciones de la pared de la tubería

Las sustancias disueltas mientras fluyen a través de las tuberías pueden tener contacto con la pared de la tubería y reaccionar con los materiales, tales como productos de corrosión o biopelícula. La cantidad de área disponible para la reacción y la velocidad de transferencia de masa entre la masa del fluido y la pared también influye en la velocidad o tasa de esta reacción. El área superficial por unidad de volumen para una tubería es igual a 2 dividido por el radio. La velocidad de transferencia de masa depende de la difusividad molecular de las especies reactivas y del número de Reynolds. Para una reacción de primer orden la velocidad de reacción de pared del tubo puede expresarse

$$r = \frac{2k_w k_f}{R(k_w + k_f)}$$

Ecuación 31

donde k_w es el coeficiente de reacción de la pared, k_f es el coeficiente de transferencia de masa y R es el radio de la tubería.

4.1.2.3 Orden de las reacciones

Suponiendo que solo se presenta transporte advectivo se utiliza la Ecuación 17 para describir el comportamiento de las reacciones de acuerdo con el orden para sustancias reactivas. La ecuación general de reacción de decaimiento y crecimiento son:

$$r(C) = k(C - C_L)C^{n-1}$$

Ecuación 32

$$|r(C) = k(C_L - C)C^{n-1}$$

Ecuación 33

respectivamente, donde C_L es la concentración límite o porción no reactiva del constituyente, k es la constante de reacción, y n es el orden de reacción. En el caso de las reacciones descritas en los numerales anteriores C_L es cero, que es el caso del cloro, y el orden de la reacción es 1.

4.1.2.3.1 Cinética de Reacciones de Primer Orden

Las sustancias reactivas con gran frecuencia son mejor descritas por reacciones de primer orden con n igual a 1 y C_L igual a 0. El cloro y otros desinfectantes en los sistemas de distribución, pertenecen a esta categoría.

$$r(C) = k(C - C_L)C^{n-1} = kC$$

Ecuación 34

Para condiciones estáticas,

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = kC$$

Ecuación 35

donde para k valores menores que cero indica decaimiento de sustancias. Resolviendo la esta ecuación diferencial se obtiene:

$$\ln(C) - \ln(C_0) = k \frac{(x - x_0)}{u}$$

Ecuación 36

Dándose cuenta que la longitud del segmento $(x-x_0)$ dividido por la velocidad promedio del flujo es igual al tiempo de viaje del segmento, t . Elevando ambos lados por e , la ecuación para el cálculo de la nueva concentración es:

$$C = C_0 e^{k \cdot t}$$

Ecuación 37

Esta ecuación puede ser utilizada para estimar la concentración al final del tubo bajo condiciones estáticas o variables conociendo el tiempo de viaje entre los puntos que se desee conocer como cambia la concentración de una sustancia.

4.1.2.3.2 Cinética de Reacciones de Crecimiento Saturado de Primer Orden

El crecimiento saturado de primer orden es un crecimiento exponencial similar al decaimiento de primer orden excepto que el signo de k es positivo y se supone que la cantidad que el constituyente puede producir está limitada. La concentración está limitada por una máxima de C_L debido a que la inhabilidad del sistema de sostener grandes concentraciones o que el productor que forma el constituyente está limitado. Un ejemplo de este tipo de reacciones es los trihalometanos que es restringida por la concentración de cloro inicial.

Para condiciones estáticas en un segmento se tiene la siguiente ecuación

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = k(C_L - C)$$

Ecuación 38

donde k es un coeficiente de crecimiento positivo, y tiene la misma forma que la Ecuación 37 por lo que su solución es la misma y el resultado obtenido es el siguiente:

$$C = C_L - (C_L - C_0)e^{-kt}$$

Ecuación 39

Como k es positivo, el segundo término en el lado derecho de la ecuación tiende a cero mientras t se incrementa y la concentración en la salida del tubo se aproxima a la concentración máxima.

4.1.2.3.3 Cinética de Reacciones de Segundo Orden

Las reacciones de segundo orden relacionan la tasa de reacción con el nivel presente del constituyente. Para niveles altos de constituyentes las tasas de concentración son elevadas. Durante la desinfección en las plantas de tratamiento, se presenta una rápida pérdida inicial correspondiente a altos niveles de desinfección. En este caso es más apropiado modelar la desinfección inicial usando una reacción de segundo orden. Después de un tiempo el agua tratada es entregada al sistema de distribución, donde las tasas de decaimiento son menores y la reacción que mejor se ajusta es de primer orden.

Se considera primero el caso en que C_L es igual a cero

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = kC^2$$

Ecuación 40

Resolviendo la ecuación diferencial y reemplazando la distancia recorrida dividida en la velocidad promedio del flujo por t , se obtiene la siguiente solución:

$$C = C_0 \frac{1}{1 - kC_0 t}$$

Ecuación 41

Para reacciones con diferente de cero la ecuación de concentración es la siguiente:

$$C = C_L + \frac{C - C_L}{1 + k(C_0 - C_L)t}$$

Ecuación 42

4.2 Métodos de Solución

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) ha desarrollado una herramienta de código libre EPANET, para la simulación de procesos hidráulicos de redes de distribución de agua potable. Este software tiene actualmente implementada una metodología para la modelación de la calidad de agua en período extendido, Método de Elementos de Volúmenes Discretos. Adicionalmente, se han desarrollado otras tres metodologías sobre EPANET para realizar una comparación de su eficiencia en consumo de memoria y tiempo de computador.

4.2.1 Método de Elementos de Volúmenes Discretos

El método de Elementos de Volúmenes Discretos se encuentra basado en la ecuación de conservación de masa suponiendo que el transporte de la masa de cada sustancia disuelta en el agua de las tuberías es advectivo, es decir, el movimiento se presenta solamente en una sola dirección. Adicionalmente, se suponen procesos de reacción cinética. El transporte de sustancias disueltas esta relacionado con la magnitud y la dirección del flujo del agua a través de la red en el tiempo.

La masa de cada sustancia es asignada a un volumen discreto de elementos dentro de cada tubo, y las reacciones ocurren al interior de cada elemento. Se utiliza un esquema de segmentación de tubos y pasos de tiempo computacional, en cual cada tubo esta dividido dentro un número de elementos de igual tamaño

espaciados a lo largo del eje del tubo. El volumen v_i de cada elemento en el tubo i no puede ser mayor a $Q_i\tau$, donde τ es el menor tiempo de viaje que tarda en recorrer una gota de agua entre los tubos de la red de distribución. En cada paso de tiempo de calidad de agua τ , la masa es advectada entre elementos adyacentes. Se definen las variables más considerables en la modelación de calidad de agua con este modo de la siguiente manera.

$$\tau = \min\left(\frac{V_i}{Q_i}\right)$$

Ecuación 43

$$n_i = \text{Floor}\left(\frac{V_i}{Q_i\tau}\right)$$

Ecuación 44

$$v_i = \frac{V_i}{n_i}$$

Ecuación 45

donde V_i es el volumen total del tubo i , n_i es el número de volúmenes en el tubo i .

A continuación se presenta el procedimiento que se ejecuta en cada paso de tiempo τ .

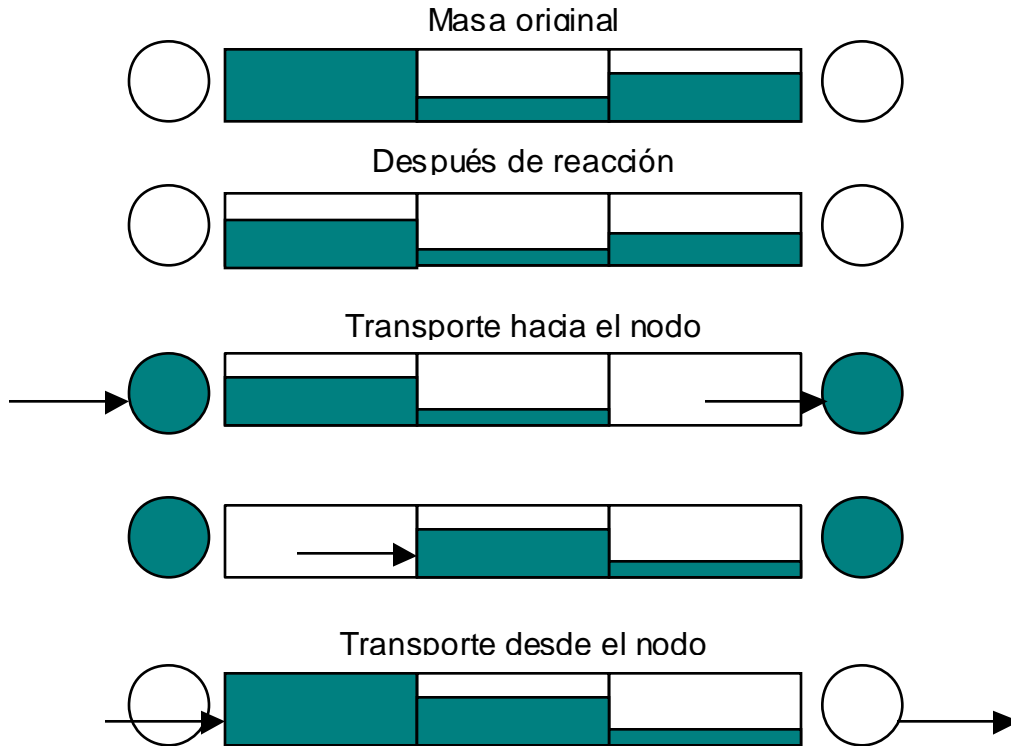


Figura 13 Pasos del transporte de masa dentro del tubo

1. Reacción de la masa dentro de cada elemento de volumen.
2. Transporte de masa y caudal desde el último elemento de cada tubo a su nodo final.
3. Cambio de masa desde el elemento de volumen k a $k+1$ de cada tubo.
4. Mover la masa de cada nodo dentro del primer elemento de volumen de todos sus nodos salientes.

Esta secuencia es repetida para cada tiempo de calidad de agua τ hasta que el siguiente evento hidráulico se presente. En el último tiempo, τ tiene que reducirse a τ' para que el tiempo total sea igual al tiempo del evento hidráulico. Para este caso se debe ajustar la masa transportada de un elemento a otro por el radio entre τ'/τ . La simulación termina cuando se hayan considerado todos los eventos hidráulicos.

Este método presenta casos extremos, los cuáles deben evitarse para no caer en tiempos de cálculos demasiado extensos o perder precisión en los cálculos. El primer caso extremo es cuando se tienen tubos con longitudes muy pequeñas y con altas velocidades, que da como resultado τ muy pequeños, por lo que se debe especificar un tiempo mínimo permitido. El otro caso se presenta con tubos con longitudes muy grandes y con velocidades muy bajas, trayendo como consecuencia un número grande de segmentos en el tubo

reduciendo la velocidad de cálculo y excediendo la capacidad de memoria del computador. Para este caso se establece un número máximo de segmentos por tubos.

La ocurrencia de cada nuevo evento hidráulico induce a un cambio en la segmentación en los tubos. En consecuencia, la masa dentro de los tubos debe ser redistribuida. A continuación se ilustra los dos casos posibles.

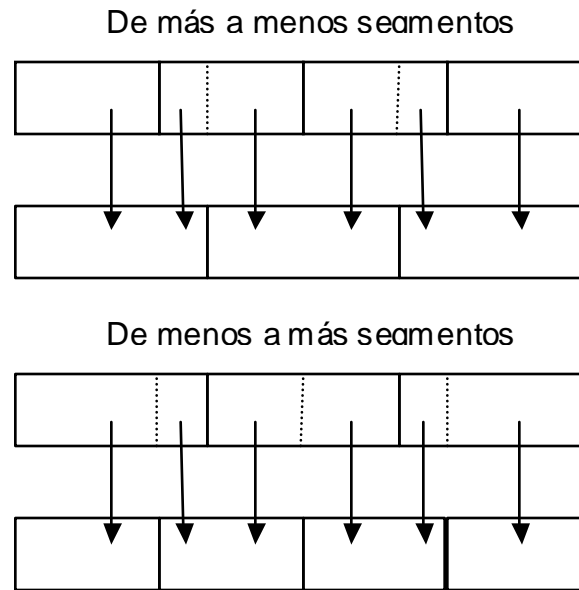


Figura 14 Redistribución de masa dentro de los tubos

4.2.2 Método de las Diferencias Finitas:

Este método plantea una solución basada en la teoría de Euler, que consiste en aproximar la ecuación diferencial con sus equivalentes en diferencias finitas a lo largo de una grilla fija de puntos en tiempo y espacio. La idea principal de este método consiste en expandir $C(x,t)$ en una serie de Taylor de segundo orden en tiempo para x fijo, usar la ecuación diferencial parcial para reemplazar las derivadas del tiempo con las derivadas espaciales, y el uso de las diferencias centrales para aproximar la derivada espacial resultante de segundo orden. Con base a esta definición, la ecuación de concentración se convierte en:

$$C_{i,s}^{t+\Delta t} = 0.5\alpha(1+\alpha)C_{i,s-1}^t + (1-\alpha^2)C_{i,s}^t - 0.5\alpha(1-\alpha)C_{i,s+1}^t + R(C_{i,s}^t)$$

Ecuación 46

donde Δx es la distancia entre cada punto especial de la grilla, Δt es el tiempo de calidad de agua, $C_{i,s}^t$ es la concentración en el punto s de la grilla del tubo i en el tiempo t , α es $u\Delta t/\Delta x$, y u es la velocidad promedio del tubo.

El resultado final es una serie de ecuaciones algebraicas para la toda la red, que pueden ser resueltas de forma explícita yendo hacia delante en el tiempo y hacia abajo en la longitud de cada tubo. Al inicio de cada evento hidráulico, una nueva grilla de espacios es elegida para cada tubo, de tal manera que α se encuentre lo más cerca posible a 1. Las concentraciones de los nuevos puntos en la grilla son encontradas por interpolación lineal a partir de los puntos anteriores.

La precisión del Método de Diferencias Finitas depende del tamaño del tiempo de calidad de agua. Adicionalmente, este método está sujeto a dispersión numérica debido a que es poco probable que α sea exactamente 1.

4.2.3 Método Dirigido por Tiempo:

Este método lleva un seguimiento de la concentración y el tamaño de las series de segmentos de agua que llenan los tubos de la red. Mientras el tiempo transcurre, el tamaño del segmento más aguas arriba en el tubo aumenta a medida que entra el agua, y en igual medida el tamaño del segmento más aguas abajo disminuye cuando el agua deja el tubo. El tamaño de los segmentos se mantiene constante.

Para cada tiempo de calidad de agua, el contenido en cada segmento está sujeto a reacciones, se lleva una cuenta acumulativa de la masa y el volumen que entra a cada nodo, y las posiciones de los segmentos es actualizado. Las nuevas concentraciones en los nodos son calculadas, adicionando la nueva concentración a los segmentos en el inicio de los tubos salientes del nodo. Si la nueva concentración difiere en una cantidad mayor a la tolerancia especificada, se crean nuevos segmentos en el inicio de los tubos. Esto se hace con el objetivo de controlar la generación excesiva de segmentos. Al comienzo de cada evento hidráulico el orden de los segmentos es intercambiado en los tubos que experimenten cambio en el sentido del flujo.

Con este método se evita la dispersión numérica dentro de las longitudes de los tubos. Sin embargo, algunas mezclas ocurren entre los segmentos que son introducidos en el nodo aguas abajo cuando más de un segmento a la cabeza en el tubo es consumido durante un tiempo de calidad de agua. La precisión de este método depende de la elección del tiempo de calidad de agua y la tolerancia en concentración utilizada para limitar la generación de nuevos segmentos.

Se presenta una ilustración del método.

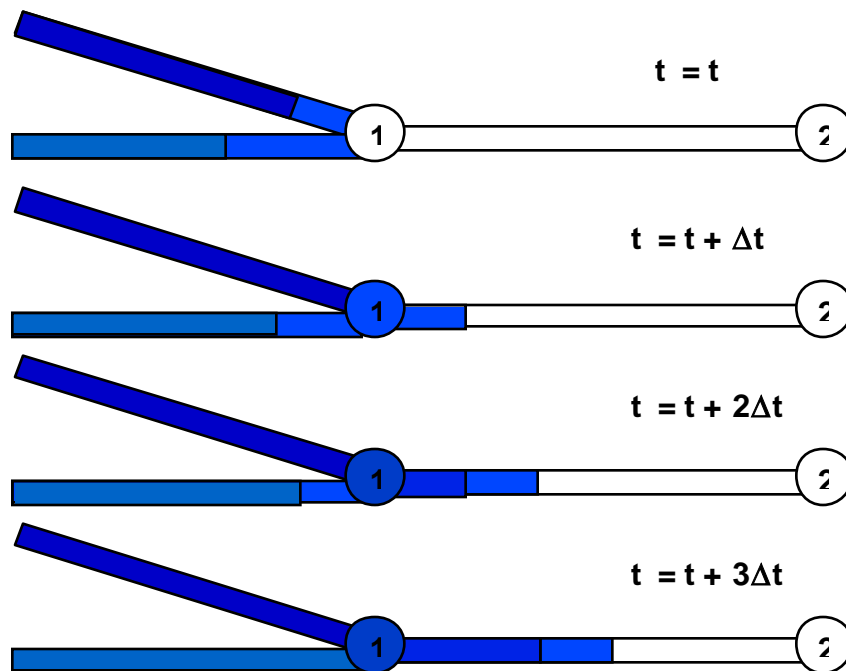


Figura 15 Método Dirigido por Tiempo

4.2.4 Método Dirigido por Evento

Este método es muy similar al anterior método descrito, excepto que en lugar de actualizar la red entera en pasos de tiempos fijos, las condiciones individuales en los tubos y los nodos son actualizados únicamente al tiempo cuando el segmento de la cabeza en un tubo, desaparece completamente a través de su nodo aguas abajo.

El Método Dirigido por Evento requiere que en cada tubo se mantenga constantemente una lista ordenada con el tiempo de vida estimado del segmento a la cabeza, hasta que este desaparezca a través del nodo aguas abajo. La estimación de este tiempo se hace con base en la velocidad del flujo en el tubo y el tamaño del segmento. De esta manera, el siguiente evento se presenta a raíz del segmento a la cabeza de la lista, que tenga el menor tiempo de vida estimado. Las acciones que se realizan, una vez presentado el evento son las siguientes: primero el segmento que originó el evento es destruido y el tiempo de simulación es actualizado; segundo, una nueva concentración es almacenada en el nodo aguas abajo, y se mezcla con las concentraciones de los segmentos a la cabeza de los tubos que llegan a ese nodo; tercero, si el cambio de concentración es

superior a la tolerancia especificada se crean nuevos segmentos en el inicio de todos los tubos con flujo saliendo del nodo; y finalmente, el tiempo de vida estimado para todos los segmentos a la cabeza de las listas de los tubos es ajustada.

Este proceso se repite hasta el finalizar el actual evento hidráulico. En ese instante, todas las posiciones de los segmentos y sus concentraciones son actualizadas. Al comienzo del siguiente evento hidráulico el orden de los segmentos es intercambiado para aquellos tubos que cambien el sentido del flujo.

A continuación se presenta una ilustración del funcionamiento del Método de Dirigido por Evento

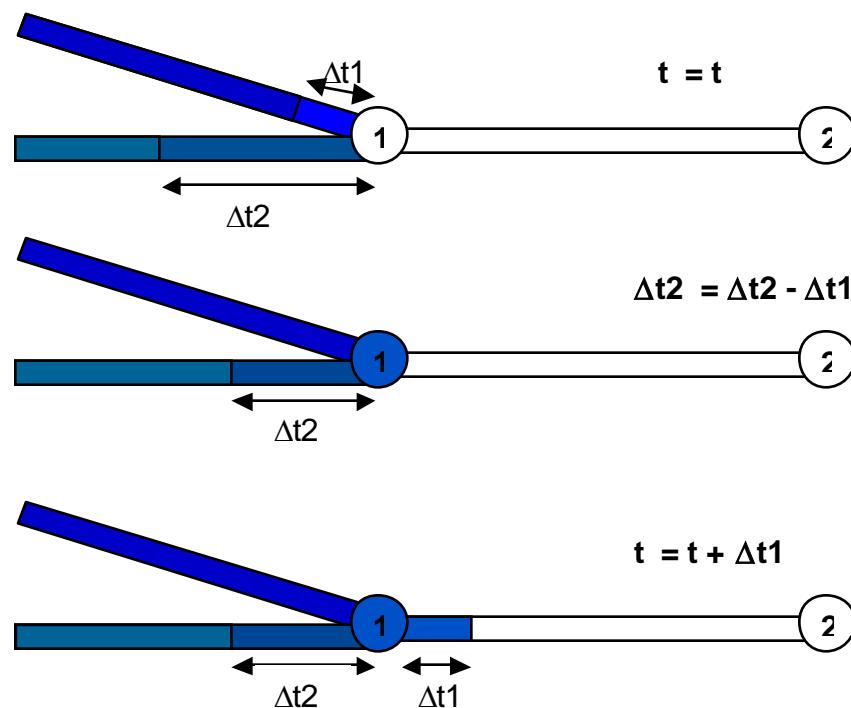


Figura 16 Método Dirigido por Evento

El Método Dirigido por Evento no presenta dispersión numérica ni errores en la mezcla de segmentos adyacentes al ser introducidos en el nodo aguas abajo. Su precisión depende únicamente de la tolerancia de concentración usada para limitar la generación de nuevos segmentos. Errores adicionales pueden presentarse cuando ocurre revertimiento del flujo para sustancias reactivas.

5 Diseño Módulo Calidad de Agua

En este capítulo se aplica la teoría descrita en los capítulos anteriores en desarrollo del diseño y planteamiento de la modelación de la calidad de agua en período extendido para redes de distribución de agua potable. Primero se realiza una comparación de la modelación de calidad de agua con algoritmos reportados en la literatura, lo cuales ya han sido bastante estudiados y son reconocidos por la comunidad de ingenieros de sistemas. Segundo se presenta el método de solución de la modelación de la calidad de agua justificando las razones para su elección y aplicación en redes de distribución. Finalmente, se desarrolla el borrador de arquitectura, que representa de una manera abstracta y gráfica el problema de calidad de agua, y posteriormente la arquitectura para un diseño flexible y extensible que permita futuras evoluciones de investigaciones y nuevos resultados en el campo de la calidad de agua.

5.1 Equivalencia de Algoritmos

5.1.1 Método de Búsqueda Codicioso

Este algoritmo consiste en encontrar soluciones factibles a varias restricciones que se tienen sobre un número dado de entradas. La solución factible que minimice o maximice una función objetivo es llamada solución óptima. La finalidad del Método Codicioso, es entonces, encontrar la solución óptima que maximice o minimice la función objetivo cumpliendo con las restricciones que se encuentren establecidas. La equivalencia de la modelación de la calidad de agua con este algoritmo se puede ver más claramente con el algoritmo de Patrones de Combinación Óptima, en la medida que para realizar la modelación se requiere una mezcla completa de las concentraciones que tiene cada caudal de una sustancia dada transportado por cada tubo que llega a un nodo.

El algoritmo de Patrones de Combinación Óptima consiste en encontrar el patrón de combinación de archivos de tal manera que se minimice la cantidad de tiempo de uso del computador.

5.1.2 Búsqueda Básica y Técnicas Transversales

El algoritmo de Búsqueda Básica y Técnicas Transversales se utiliza cuando para la solución del problema se necesita manipular árboles binarios, árboles y grafos, en este caso el uso de este algoritmo es esencialmente para grafos; ya que como se definió previamente, los sistemas de distribución pueden ser representados a

través de grafos. La principal razón del uso de este algoritmo es para cuando la búsqueda de una determinada propiedad de un nodo involucre la revisión de cada nodo del grafo.

La definición del algoritmo Primera Búsqueda Profunda y Traversa es la que mejor se acopla a la solución del problema de la modelación de la calidad de agua. Este algoritmo explora cada nodo del grafo, que consiste en visitar cada nodo adyacente a él. La búsqueda termina cuando todos los nodos se encuentran explorados. La implementación del algoritmo puede realizarse de forma no recursiva, mediante la utilización de una pila.

5.2 Metodología de Solución

El método de solución que se seleccionó para la modelación de calidad de agua esta basado en gran parte en la teoría langragiana del método dirigido por tiempo explicado en el capítulo anterior, modificando algunas de sus características para obtener una mayor flexibilidad y eficiencia del método.

Partiendo de la teoría de segmentación de los tubos de la red de la teoría eurleriana del método de volúmenes discretos y aplicándola sin modificar la base teórica sobre la cual esta definido el método dirigido por tiempo, se establece un tiempo de calidad τ . Este tiempo regirá el tamaño de los segmentos que se crean y adicionan al inicio de cada tubo. Adicionalmente, su elección afecta en la precisión de los resultados y el tiempo de cálculo, un tiempo de 5 minutos es recomendado para obtener resultados muy cercanos a los que se presentan en la realidad en las redes de acueducto.

Con el tiempo fijo τ la generación de nuevos segmentos no depende de la velocidad de reacción del constituyente que se esté modelando, y teniendo volúmenes iguales de segmentos entrando al inicio de cada tubo durante un evento hidráulico, la modelación de la variación de la concentración en cada segmento puede realizarse para varios constituyentes al mismo tiempo. Con esto se evita el recorrido varias veces de los nodos de la red cada vez que se desee modelar un constituyente diferente. En la realidad la pérdida de desinfectante como el cloro en las tuberías del sistema de distribución generan la formación de sustancias secundarias que en grandes cantidades afectan la salud de las personas, un ejemplo de estas sustancias es el trihalometano (THM). Una modelación de este comportamiento en la realidad se puede llevar a cabo con un mayor acercamiento por el método de solución propuesto, porque la formación de THM depende de la cantidad presente en el agua de cloro.

La segmentación de los tubos permite realizar la modelación de la calidad de agua recorriendo los tubos para calcular las reacciones de los constituyentes en el tiempo τ , y los nodos para calcular la mezcla de las concentraciones provenientes de los tubos que llegan a cada nodo, sin que importe el orden en que los

recorridos se realicen. Sin embargo, se presentan más recorridos de los tubos y nodos de los necesarios. La flexibilidad y desacople de los componentes de la arquitectura del método propuesto de solución que se explicará más adelante posibilita el desarrollo de diferentes métodos de búsqueda o de recorridas de los elementos de la red para calcular la calidad de agua para cada tiempo de calidad τ . La otra forma de recorrer los elementos de la red es mediante un previo ordenamiento de los nodos del grafo en sentido del flujo de la red, es decir, los nodos padres deben ser recorridos previamente que sus nodos hijos. Para evitar complejidades de $\theta(n^2)$ en el ordenamiento de los nodos, se debe tener información replicada en los elementos de la red. Los tubos deben tener información sobre su nodo inicial y nodo final, y los nodos deben tener información sobre a que tubos pertenecen.

5.2.1 Recorrido sin ordenamiento

El recorrido de los elementos de la red para la estimación de la calidad de agua para cada tiempo τ , se realiza en manera similar a la descrita en el método de volúmenes discretos, basado en la teoría lagrangiana donde se actualiza la posición de cada segmento en el tubo al que pertenece y se modifica el volumen de los segmentos a la cabeza cuya suma de volumen sea inferior al volumen adicionado al inicio del tubo igual a $Q\tau$, donde Q es el caudal actual en el tubo. Para un mejor entendimiento y una explicación más detallada se ilustra cada uno de los pasos que se realizan en cada tiempo de calidad τ en todos los tubos y nodos de la red.

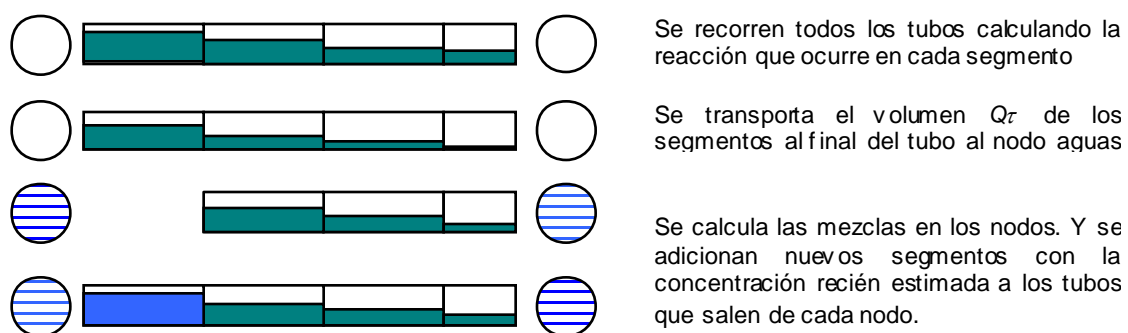


Figura 17 Procedimientos sin ordenamiento previo de los nodos

Si se tiene una lista que almacene los segmentos de cada tubo y se garantiza que el volumen del segmento adicionado a cada tubo es igual al volumen extraído de los segmentos en la cabeza, la lista por ser una estructura de datos donde el primero que entra es el primero en salir, representa lo que sucede en las tuberías y la posición de los segmentos se actualiza automáticamente.

Cuando se presenta flujo reverso en los tubos en un nuevo evento hidráulico se debe revertir el orden de los segmentos en las listas de dichos tubos, es decir, para n segmentos, la nueva posición del segmento i será $n-(i+1)$, donde i va desde 0 hasta $n-1$. De esta forma el segmento de la cola queda en la cabeza, y el segmento de la cabeza queda en la cola. Para los tubos cuyo sentido del flujo no cambie no se presenta ninguna modificación en la estructura de datos.

5.2.2 Recorrido con ordenamiento

Realizando un ordenamiento de los nodos para cada evento hidráulico con base en los sentidos del flujo del agua y con base en la teoría de grafos dirigidos acíclicos, se ordenan en una lista los nodos de la red, de tal manera que los nodos padres se adicionen primero a la lista que sus nodos hijos. En cada nodo se conoce los tubos que llegan a ese nodo y los tubos que salen de él. Para reducir los tiempos de cálculo se replica la información en los tubos, es decir, cada tubo conoce cual es su nodo inicial y cual es su nodo final.

Una vez ordenados los nodos, en cada tiempo de calidad de agua τ , se recorre la lista, y para cada nodo se calcula la mezcla de las concentraciones de los caudales provenientes de los tubos que llegan al nodo. Con esta concentración se crea cada segmento para los tubos que salen del nodo, con un volumen igual a $Q\tau$, donde Q es el caudal del tubo al cual será adicionado el segmento. Se calcula las reacciones en los segmentos para cada tubo saliente del nodo, excepto el último segmento, el cual ha sido recientemente añadido. Después, se desplazan los segmentos y se modifica el volumen de los segmentos a la cabeza cuya suma de volumen sea inferior al añadido, ya que este debe ser vertido en el nodo aguas abajo de cada tubo. Estas acciones se repiten para cada nodo en todos los tiempos τ . A continuación se ilustra el proceso que lleva a cabo en cada nodo.

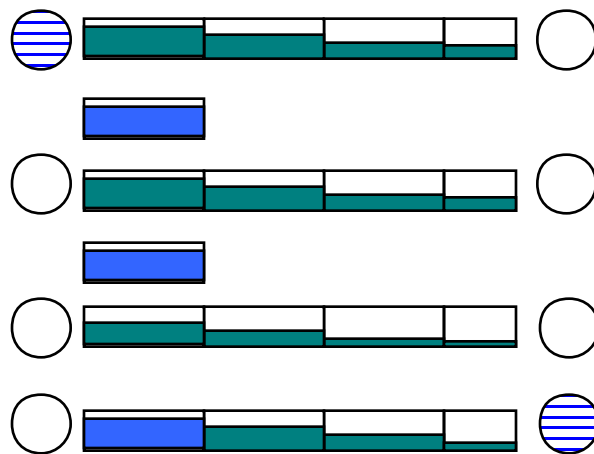
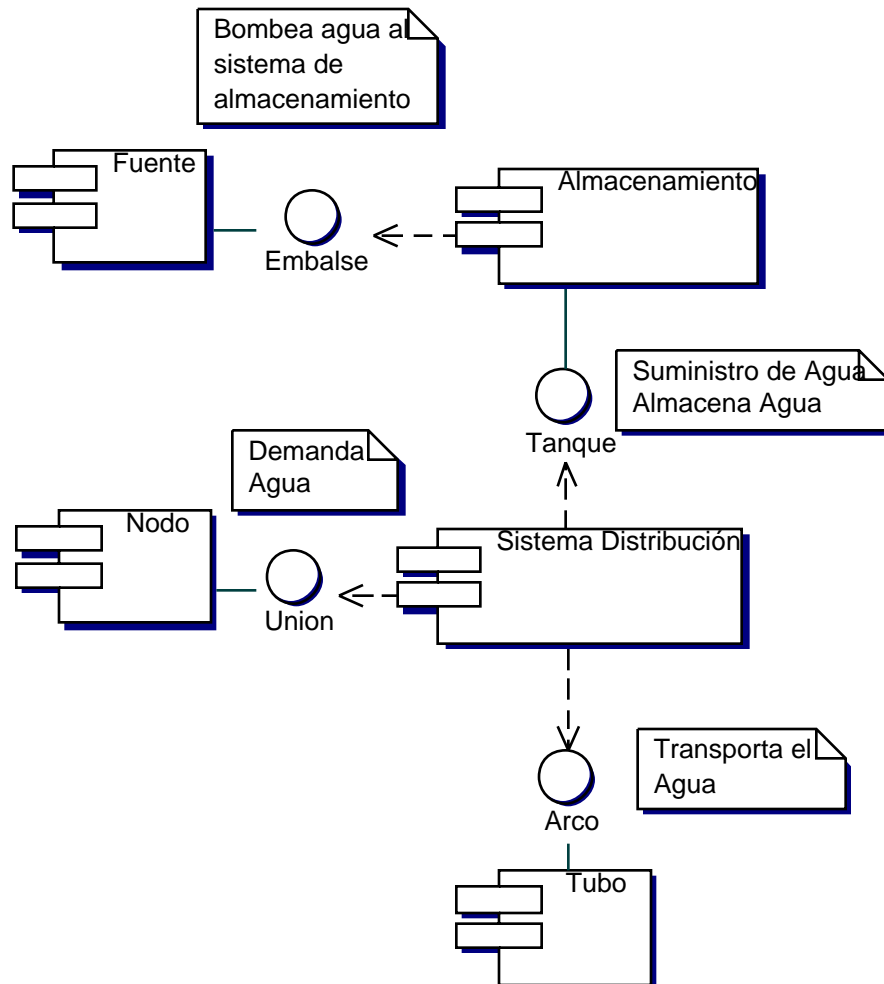


Figura 18 Procedimientos con ordenamiento previo de los nodos

5.3 Borrador de Arquitectura

El Borrador de Arquitectura realiza una abstracción gráfica del problema del transporte y distribución del agua a través de los tubos, desde las fuentes de suministro y almacenamiento hasta cada uno de los nodos, que representan el consumo de los usuarios de la red de acueducto.



En el diagrama se muestra cada uno de los componentes que intervienen en el sistema de distribución de agua potable. Con este modelo se conceptualiza el problema real y es una gran base y punto de partida para desarrollar la Arquitectura de Software.

Los componentes del diagrama están conectados mediante interfaces que tienen asignadas las funciones que desempeña cada componente. Hay dos tipos de

conectores. El primer conector es una línea continua que simboliza la implementación de la interfaz por parte del componente. El segundo conector es una flecha con línea intermitente que simboliza el uso de la función que tiene asignada la interfaz hacia la cual esta apuntando.

5.4 Arquitectura del Módulo Calidad de Agua

La implementación de un módulo para la modelación de calidad de agua en período extendido para el programa REDES, debe desarrollarse de manera que su arquitectura se acople a la arquitectura ya existente en este software, permitiendo evolución y flexibilidad de la nueva implementación así como la de los componentes ya existentes, sin generar conflictos o demoras en la ejecución del programa. El código debe ser reutilizable ofreciendo servicios a futuros nuevos componentes que se puedan desarrollar y requieran de métodos o cálculos realizados en el módulo de modelación de calidad de agua en período extendido.

5.4.1 Arquitectura del Programa Redes

La documentación del programa REDES así como la arquitectura de software, no se encuentra disponible, dificultando la concepción de la estructura y acoplamiento de nuevos módulos. Por ello, se necesita realizar ingeniería reversa para construir la arquitectura de software de la estructura principal del programa.

El programa REDES está dividido en dos partes importantes, la interfaz gráfica y la lógica del negocio. Las interfaces gráficas o ventanas están controladas por una clase central que se encarga de actualizar cada ventana con los cambios que ocurran en las clases de la lógica del negocio. Sin embargo, no se encuentra implementado el patrón MVC debido a que la actualización de la información en las ventanas no esta sincronizada automáticamente cuando se presente algún cambio. La parte de negocio tiene una clase central que hace función de fachada de todos los servicios que ofrecen las clases de negocio y se comunica con la clase que controla las interfaces. A continuación se presenta un breve esquema

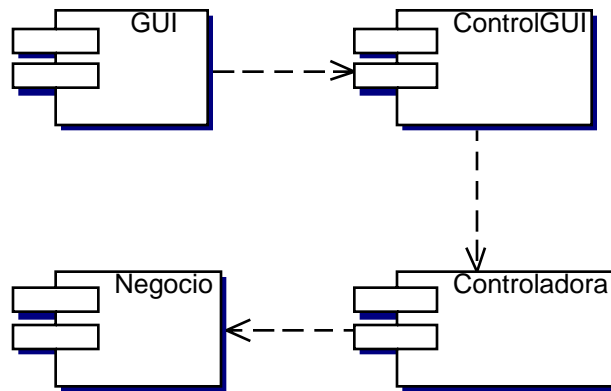


Figura 19 Esquema del Programa REDES

La lógica de negocio está dividida en grandes módulos de acuerdo con la función que realicen. Cada módulo tiene una clase central que realiza una función de fachada y se comunica con la clase central (fachada) de los módulos que necesite alguna información o servicio. No se presentará ninguna arquitectura más detallada de la parte interfaz gráfica porque su complejidad es muy sencilla y tiene muy poca diferencia con el anterior esquema. A continuación se presenta la arquitectura de la división de la lógica de negocio en módulos

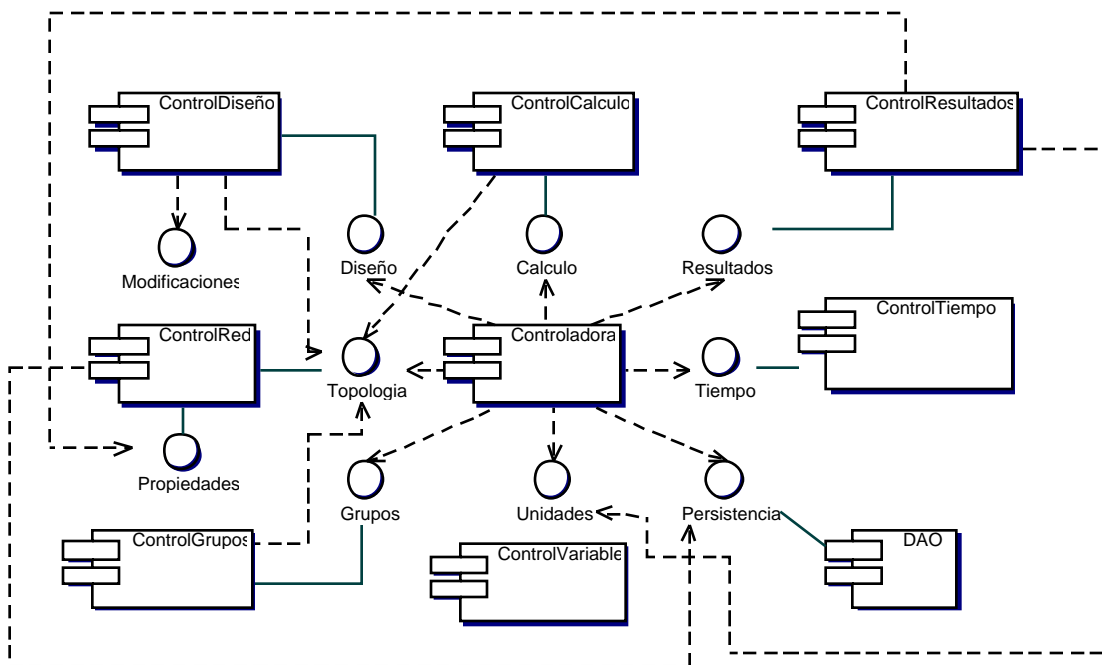


Figura 20 Arquitectura del programa REDES

En la arquitectura de la división de funcionalidad de los módulos las interfaces representan la función que cada módulo desempeña. El módulo ControlRed por contener la información de los elementos de la red, así como el grafo que

representa la conexión entre los elementos, tiene asociado varias interfaces. En la implementación de la arquitectura, no se tienen interfaces por limitaciones del lenguaje de Programación Delphi, por lo que las clases centrales de cada módulo están muy acopladas y relacionadas. Los módulos están divididos en funcionales y no funcionales. Los módulos ControlDiseño, ControlRed, ControlCalculo y DAO son funcionales porque cumplen los requerimientos que el software debe ser capaz de desarrollar, además que transforman datos de entrada para entregar salidas del sistema. Los módulos ControlGrupos, ControlVariable, ControlTiempo, ControlResultados son no funcionales porque tienen que ver con las características que una u otra forma limitan el sistema.

La extensión de cada módulo no se desarrolló porque sólo es necesario conocer las funciones y servicios que ofrecen los módulos ControlRed, ControlTiempo y ControlVariable para el desarrollo del Módulo de Calidad de Agua en período extendido. Los protocolos de conexión entre módulos y la Clase Controladora no son complicadas, debido a que el diseño y arquitectura del programa REDES está basado en el Patrón Fachada, no muy eficiente pero sencillo de entender y desarrollar.

5.4.2 Esquema General

La Arquitectura del módulo de Calidad de Agua en Período Extendido debe hacerse flexible y extensible, que permita futuras mejoras o nuevas implementaciones que surjan con nuevas investigaciones nacionales e internacionales en el tema de calidad de agua. Las clases del módulo que tengan diferentes funciones deben estar muy desacopladas por medio de interfaces que separen su implementación de su la función que desempeñan. En el lenguaje de programación Delphi no se permite el uso de interfaces, por lo que para desacoplar las funcionalidades de las clases se utilizará clases abstractas en lugar de interfaces.

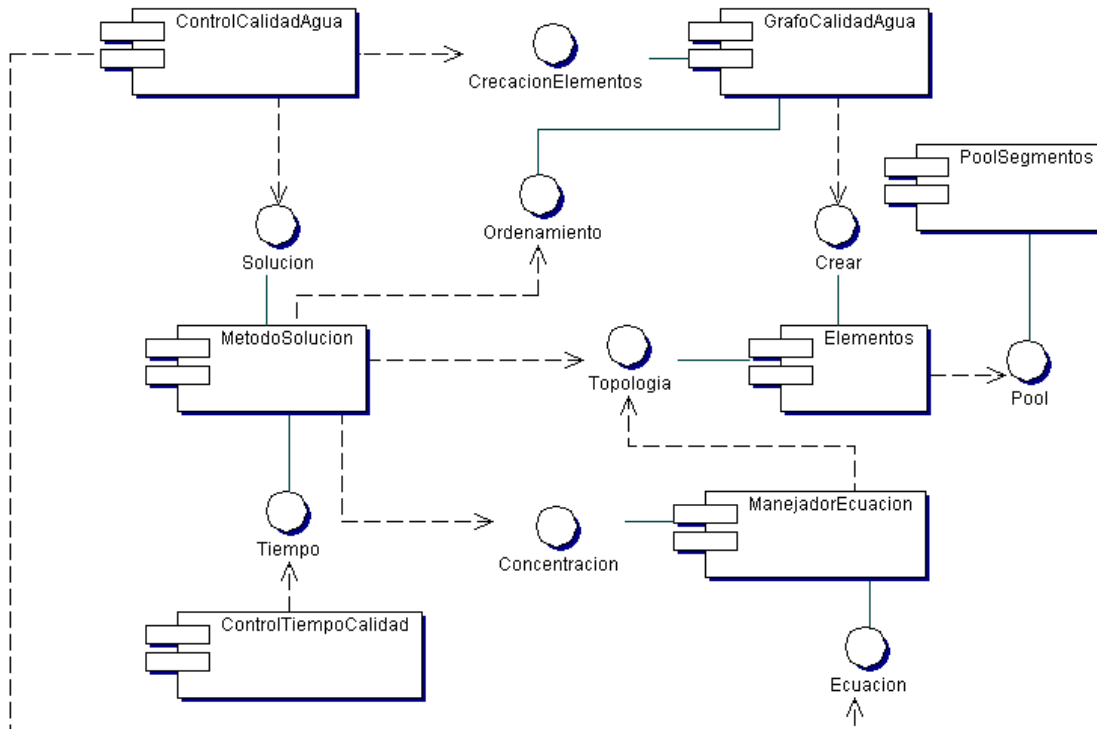


Figura 21 Arquitectura del Módulo de Calidad de Agua

En el diagrama se muestra la conexión entre los componentes que forman parte del módulo de calidad de agua en período extendido. Esta conexión se realiza mediante el servicio que le ofrece un componente a otro, y el nombre de la interfaz es dicho servicio. La conexión con los demás módulos del programa REDES se lleva a cabo mediante el componente central ControlCalidad, siguiendo la metodología del Patrón Fachada.

Adicionalmente, en el diagrama se puede observar el desacoplamiento de cada componente por medio de las interfaces, esto gracias a que un componente solo conoce las funciones o servicios de los demás componentes, sin enterarse de su respectiva implementación. En los numerales siguientes se desarrollará más en detalle cada componente.

5.4.3 Control de Tiempo Calidad

Este componente es el encargado de manejar los tiempos de calidad de agua y los tiempos de los eventos hidráulicos. La arquitectura del componente es sencilla, pero necesita comunicación con el módulo de ControlTiempo a través del componente ControlCalidad. Su función es informar el tiempo para cada evento de calidad de agua, donde se realiza los recorridos sobre los elementos de la red para estimar la calidad de agua, indica cuando se ha terminado de modelar la calidad de agua para cada evento de hidráulico y cuando la modelación ha terminado.

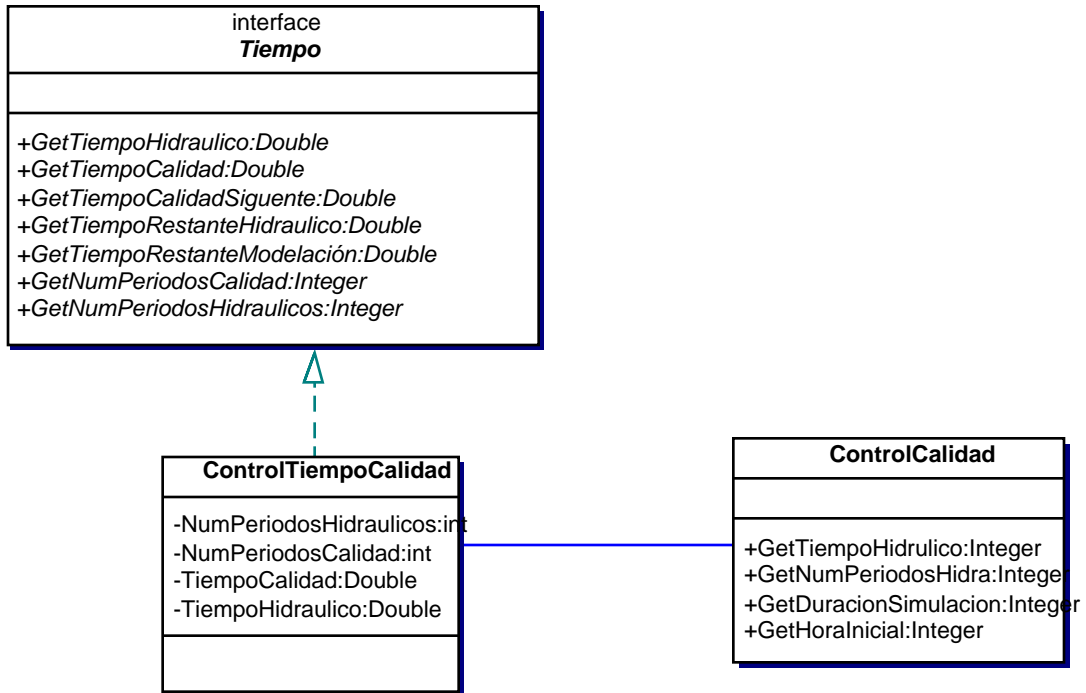


Figura 22 Componente de Tiempo

5.4.4 Manejador de Ecuaciones

Este componente contiene las ecuaciones para las diferentes sustancias que se quieran modelar, incluyendo la edad del agua y el trazador para una unión en especial. La función del componente Manejador de Ecuaciones es calcular la reacción para cada sustancia que se quiere modelar en todos los tubos y tanques de la red.

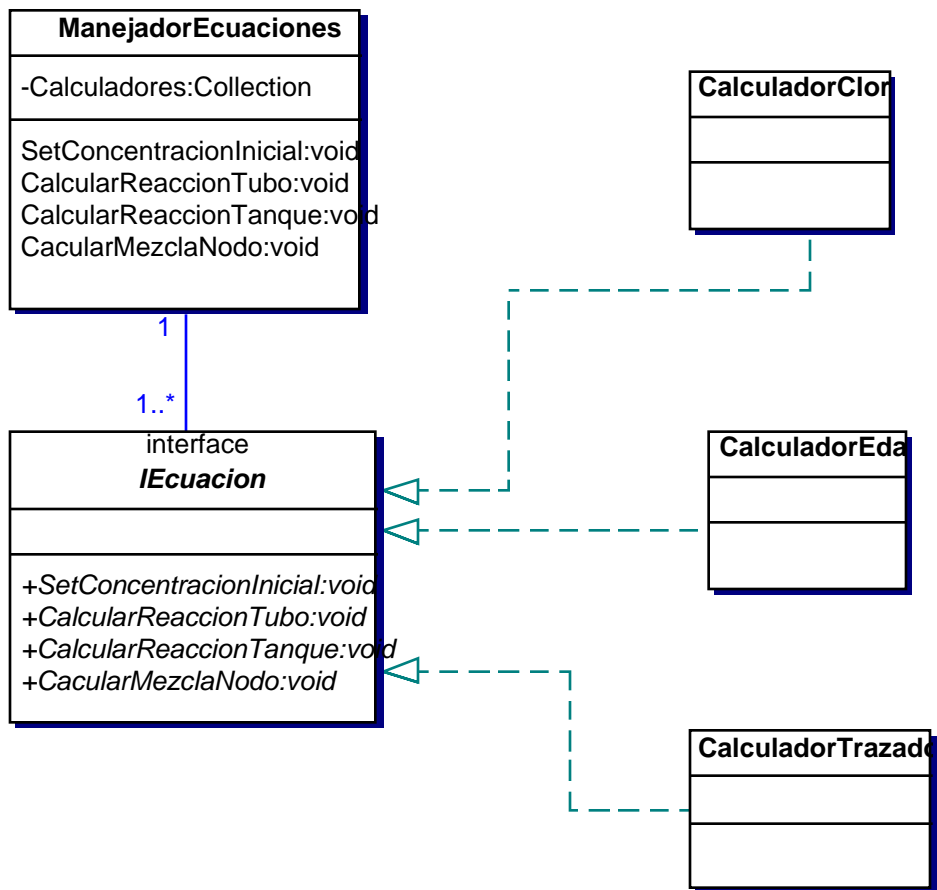


Figura 23 Componente Manejador de Ecuaciones

5.4.5 Grafo Calidad de Agua

Este componente crea los elementos de calidad agua que se requieren con información topológica de la red. Para evitar la creación y solicitud de espacio en memoria, se mantiene la información de la red en cada modelación de calidad de agua, de tal manera, que si se quiere modelar una nueva red se libera espacio en memoria y se crean nuevos elementos de calidad de agua, de lo contrario solamente se inicializan. Para cada evento hidráulico este módulo revisa los tubos cuyo sentido de flujo cambie, y les indica que reorienten sus segmentos. En el método de solución que requiera ordenamiento previo de los nodos de la red, entrega una lista con los nodos ordenados de acuerdo con el sentido del flujo del agua por la red.

Se tiene un Pool de segmentos que maneja la creación y almacenamiento de segmentos, cuando estos cumplen su tiempo de vida en cada tubo, es decir, cuando se consumen por completo en el nodo aguas abajo. Con esta clase se

evita crear un número de segmentos mayor al número máximo de segmentos utilizados durante toda la modelación de la calidad de agua.

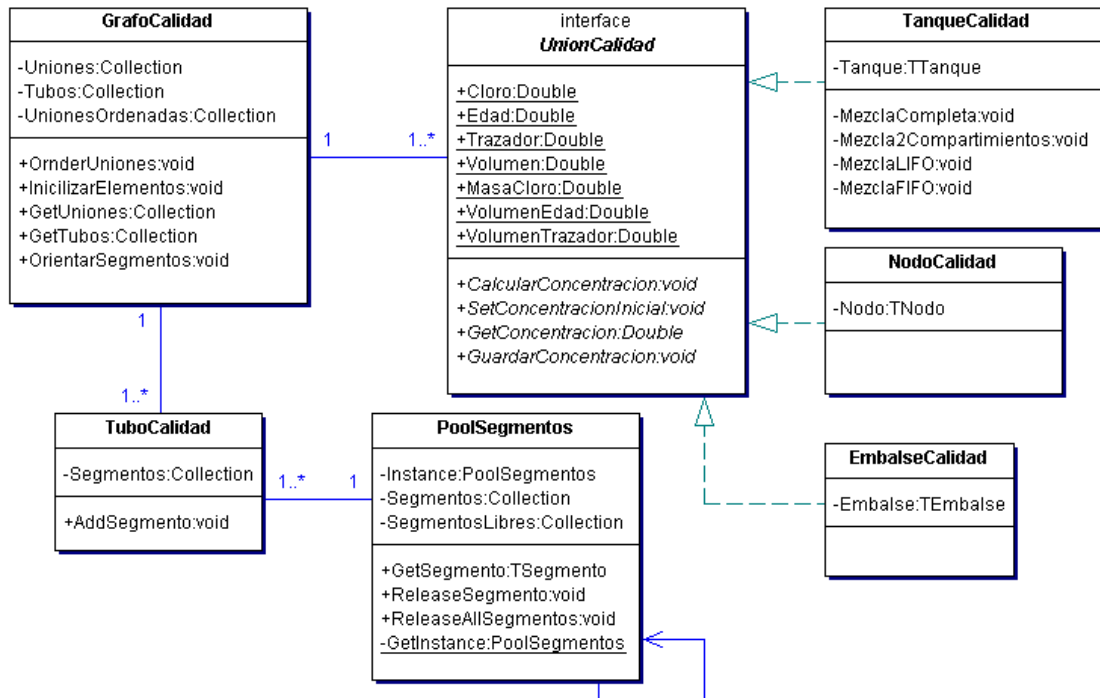


Figura 24 Componente Grafo de Calidad

5.4.6 Método de Solución

Como se explicó anteriormente se desarrollaron dos métodos de solución con diferencia en el número de recorridos y ordenamiento de los nodos de la red. Se presenta a continuación el diagrama del método de solución.

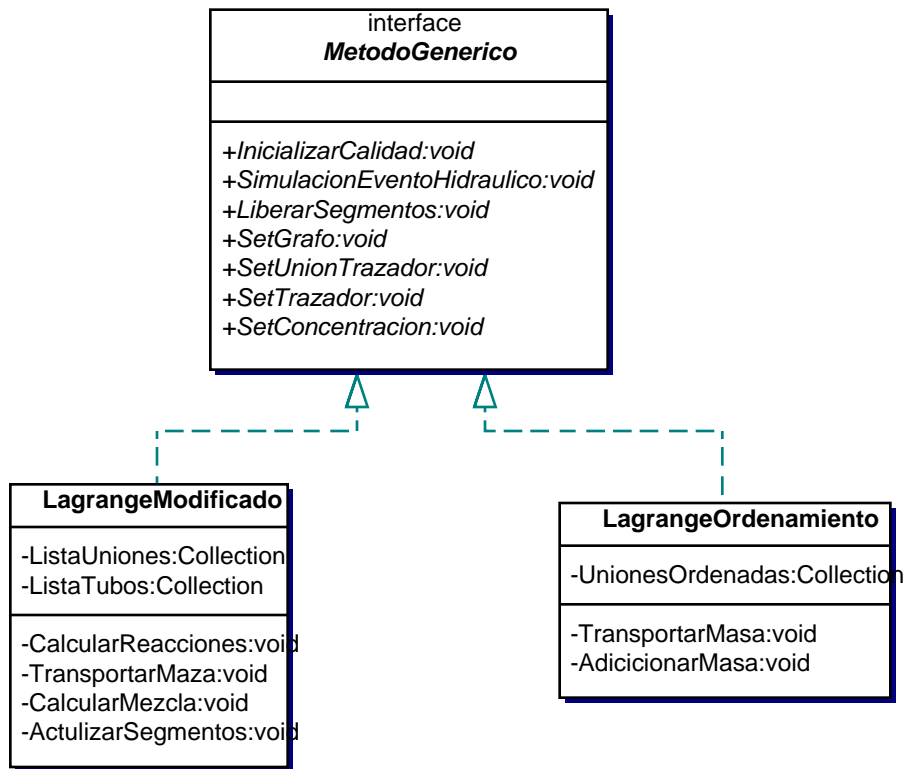


Figura 25 Método de Solución

Se establece los parámetros y las funciones que deben tener los métodos de solución que se deseen implementar para la modelación de la calidad de agua. Con la arquitectura del módulo de calidad de agua, se tiene la posibilidad de implementar cada uno de los métodos de solución descritos en el capítulo anterior, si necesidad de modificar alguna de las otras clases que conforman el módulo. Cada clase es totalmente independiente y no se entera de la implementación de las demás clases.

5.4.6.1 Lagrange Modificado

El nombre de la clase proviene de la forma como se implementa la interfaz para el método de solución, que se realiza con base en la teoría de Lagrange del método dirigido por tiempo. No requiere que la lista de nodos se encuentre ordenada para la ejecución de las simulaciones que conlleven a la resolución de la modelación de la calidad de agua. A pesar que se hacen 2 recorridos de la lista de nodos y el mismo número la lista de tubos, su complejidad se mantiene siendo lineal siendo un algoritmo muy rápido y eficiente.

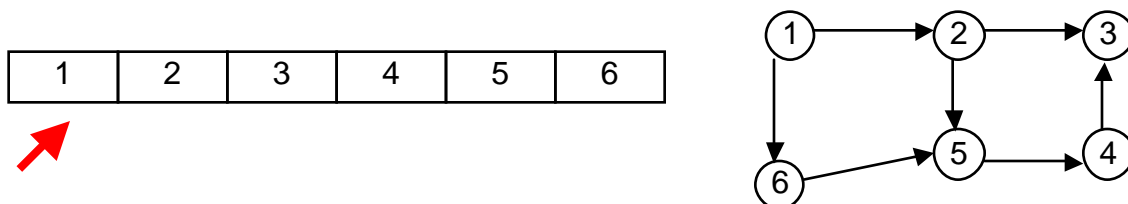
5.4.6.2 Lagrange Ordenamiento

La implementación de esta clase se basa también en la teoría de Lagrange del método dirigido por tiempo, pero al inicio de cada evento hidráulico requiere de un ordenamiento previo de los nodos de la red. Se realiza un menor número de recorridos de los elementos de la red para cada simulación de calidad de agua. Sin embargo, su eficiencia y rapidez depende de la complejidad del ordenamiento de los nodos. En algoritmos de ordenamiento no eficientes la complejidad puede llegar a ser de $\theta(n^2)$, aumentando los tiempos de ejecución del método de solución y haciendo más eficiente la implementación de Lagrange Modificado. Con algoritmos de ordenamiento eficientes la complejidad que se obtiene es de $\theta(n \cdot \text{Log}(n))$, que sigue siendo menos eficiente y rápida que la implementación de Lagrange Modificado. La única forma de conseguirse un mejor desempeño en tiempo, es si el ordenamiento de los nodos de la red se hace con una complejidad lineal. A continuación se describe el algoritmo de ordenamiento lineal.

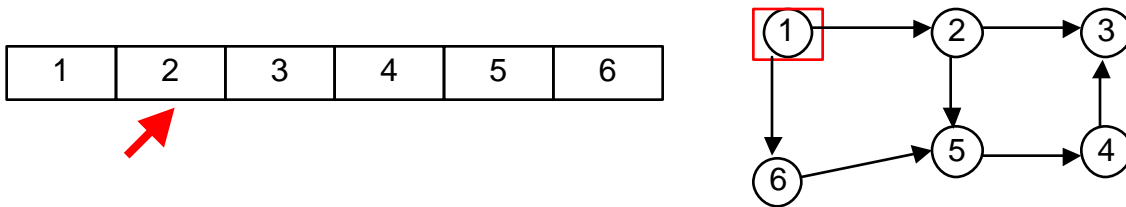
5.4.6.2.1 Ordenamiento de Grafos Dirigidos Acíclicos

Los Grafos Dirigidos Acíclicos solo permiten un solo sentido de viaje para dos nodos adyacentes; de igual manera los caminos posibles entre dos uniones del grafo siempre van a estar dirigidos de un unión a la otra. Tomando esto como base la forma de insertar cada unión de la red en la lista de ordenamiento se va haciendo para los uniones cuyos uniones padres ya hayan sido insertadas previamente.

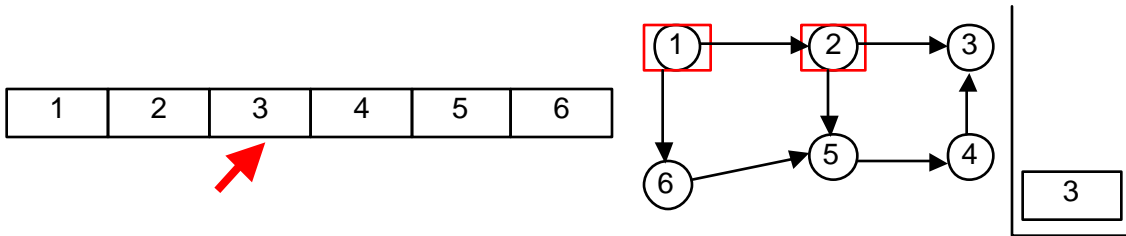
La metodología de este algoritmo consiste en recorrer las uniones de la red almacenadas en una lista sin importar como fueron adicionadas, y para cada unión se revisa que cada una de sus uniones padres se encuentre previamente almacenada en la lista de ordenamiento, y cuando se encuentre una unión padre no almacenada se guarda en una pila la unión con el índice de la unión padre que no se ha almacenado, y se procede a revisar si la unión padre tiene todas sus uniones almacenadas, para de esta manera insertarse en la lista de ordenamiento. Si se presenta el caso que dicha unión padre también tenga una unión padre no almacenada el procedimiento se repite. Una forma sencilla de realizarse sería recursivamente, pero para obtener una mayor eficiencia en tiempo y memoria se hace iterativa por medio de la pila. A continuación se presenta un ejemplo del ordenamiento de una red pequeña de acueducto con los sentidos del flujo ya establecidos.



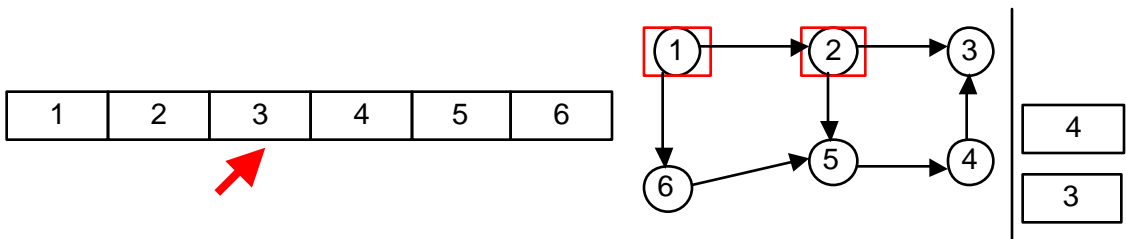
La unión 1 no tiene ninguna unión padre, se almacena en la lista de ordenamiento.



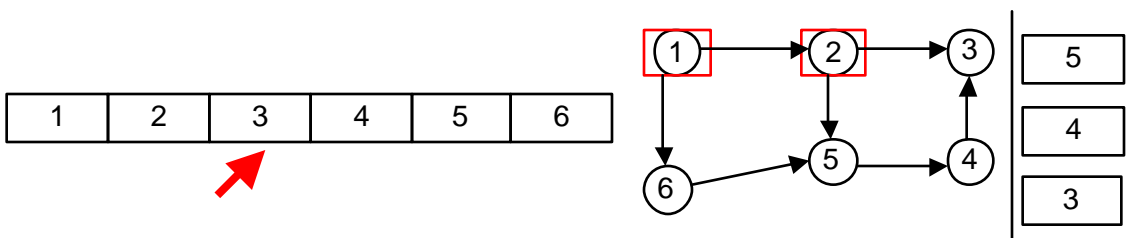
La unión 2 sólo tiene una unión padre, que ya se encuentra almacenada. La unión 2 se almacena en la lista de ordenamiento.



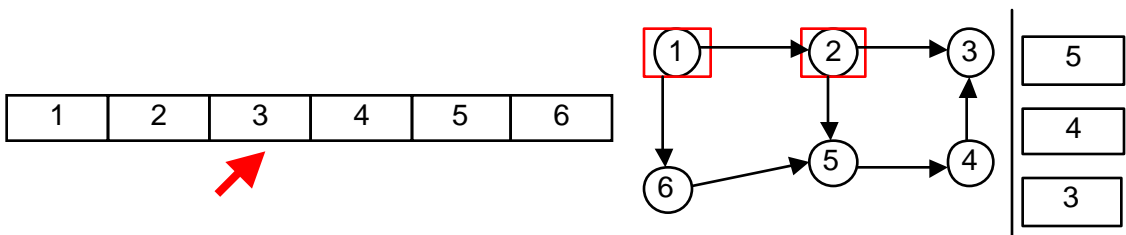
La unión 3 tiene dos nodos padres, uno ya se encuentra almacenado pero la unión 4 todavía no. Se guarda la unión 3 en la pila.



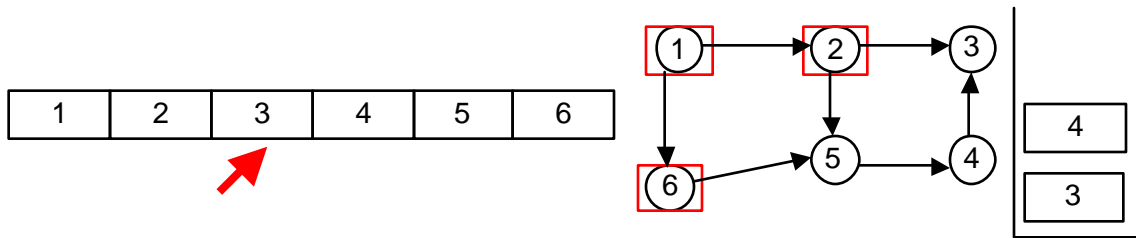
La unión 4 tiene como unión padre la unión 5 que tampoco ha sido almacenada. Se guarda la unión 4 en la pila.



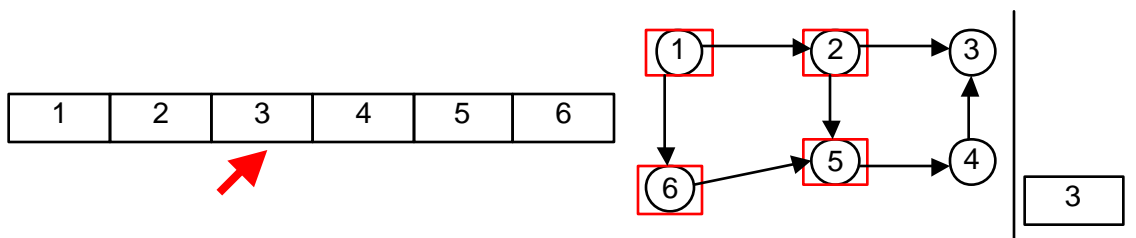
La unión 5 tiene dos uniones padres, la unión 6 no ha sido almacenada en la lista de ordenamiento. Se guarda la unión 5 en la pila.



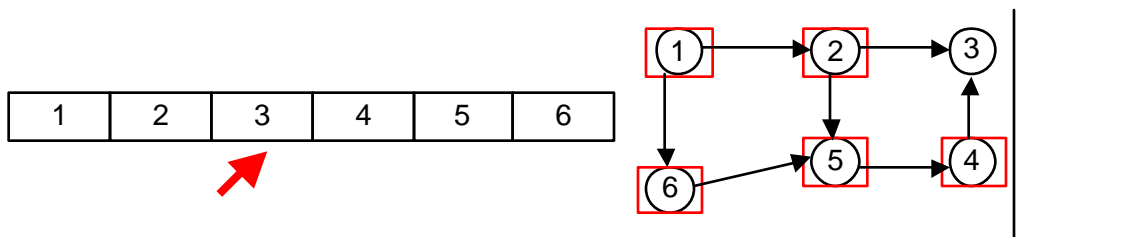
La unión 6 tiene sus uniones padres almacenadas. Se almacena en la lista de ordenamiento. Se toma la unión 5 que esta en el tope de la pila.



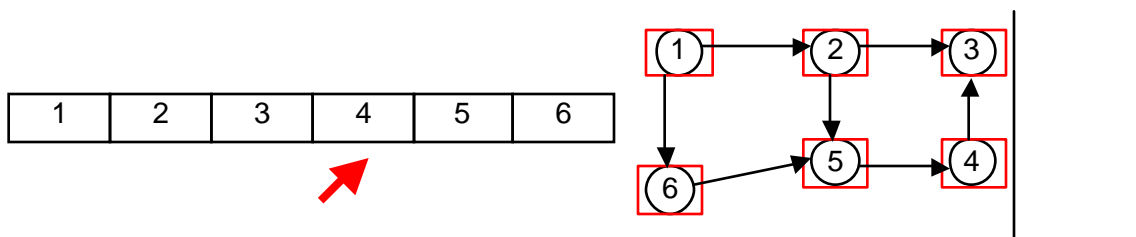
La unión 5 ya tiene todas sus uniones padres almacenadas. Se almacena en la lista de ordenamiento. Se toma la unión 4 que esta en el tope de la pila.



La unión 4 ya tiene todas sus uniones padres almacenadas. Se almacena en la lista de ordenamiento. Se toma la unión 3 que esta en el tope de la pila.



La unión 3 ya tiene todas sus uniones padres almacenadas. Se almacena en la lista de ordenamiento.



Se sigue recorriendo la lista. Como todas las uniones se encuentran almacenadas en la lista de ordenamiento se termina el ordenamiento.

Para garantizar que el ordenamiento presente complejidad lineal, y que solo se recorra la unión una vez, se debe replicar información, de manera que los tubos

contengan apuntadores a la unión inicial y final, y que cada unión contenga apuntadores a los tubos que entren o salgan de la unión.

La solución desarrollada para la modelación de calidad de agua en período extendido en redes de distribución de agua potable descrita en este capítulo, presenta una gran flexibilidad y desempeño en los ambientes de trabajo de usuarios de programas de modelación de acueductos. Permitiendo que se ajuste el manejo del módulo de calidad de agua a cada una de las necesidades de los diferentes usuarios. Adicionalmente, esta solución tiene la opción de mejorar de los alcances del módulo sin gran dificultad, para nuevas investigaciones que se realicen en el campo de calidad de agua.

6 Lenguaje Propósito Específico

Los lenguajes de propósito específico son lenguajes diseñados especialmente para solucionar un rango particular de problemas. Ejemplos de lenguajes de propósito específico son los lenguajes de HTML y SQL, diseñados para representación gráfica de las páginas Web y realización de consultas y actualización de bases de datos, respectivamente. La especialización de la finalidad del lenguaje permite entonces, convertir problemas grandes y complejos en problemas pequeños y sencillos, donde la abstracción de los conceptos del dominio se realiza a un nivel más alto.

La semántica y gramática de los lenguajes de propósito específico generalmente están limitadas al dominio, proporcionando notaciones dirigidas al dominio de una aplicación en particular. Por esto, LPE ofrecen sustanciales beneficios en expresividad y fácil utilización, incrementando la productividad y reduciendo los costos de mantenimiento. Con la reducción en la cantidad del dominio y la experiencia en programación, se abre la posibilidad a la participación de un grupo más grande de desarrolladores de software de diferentes profesiones. En general la ingeniería de software excluye del diseño de software, la participación de expertos en el dominio, debido a que se requiere conocimiento de las notaciones definidas en los campos de esta ingeniería.

El desarrollo del lenguaje específico para el programa REDES busca involucrar a sus usuarios en la programación de acciones sobre las redes de distribución de agua que se estén trabajando sobre el software, para simular en mayor medida lo que ocurre en la realidad, y que permita un control sobre las actividades y operaciones que se realizan cuando el programa se encuentra en ejecución, sobre todo cuando se está corriendo el cálculo hidráulico extendido.

En este capítulo se presentará un breve resumen de los diferentes patrones de diseño en la implementación de un lenguaje de propósito específico, para después explicar cuales fueron utilizados en la implementación del lenguaje para el programa REDES.

6.1 Patrones de Diseño

Los lenguajes de propósito específico (LPE) están compuestos por un dominio pequeño, implementado para el uso en la solución de problemas determinados, con ciertas restricciones para su diseño y desarrollo, siendo necesarias estrategias que puedan ser reutilizadas y aplicadas para problemas con características en común. Estas estrategias para el diseño hacen referencia a patrones que

generalizan las acciones a ejecutarse y las estructuras de la arquitectura para cada implementación de un nuevo lenguaje.

Los siguientes patrones de diseños están muy relacionados unos con otros, por lo que la utilización de alguno de ellos conlleva a la utilización en paralelo o en conjunto de otro patrón. A continuación se describen los patrones de diseño para lenguajes de propósito específico.

6.1.1 Piggyback:

Este patrón utiliza para el diseño de un nuevo lenguaje los elementos ya definidos de otro lenguaje, como el manejo de variables, estructuras de datos, procesos de compilación. De esta manera se obtiene un soporte lingüístico gratis. Lo que se busca con este patrón es una estructura que se puede leer más fácilmente, pero que hace uso de las habilidades de un lenguaje de propósito general para realizar la compilación de la aplicación.

6.1.2 Pipeline

La aplicación de este patrón se lleva a cabo cuando para la solución de un problema, se necesita de la composición de varios lenguajes de propósito específico. Un claro ejemplo, es cuando se desea expresar varias operaciones, como ecuaciones matemáticas, fórmulas químicas y gráficas. De esta manera, los LPE son diseñados en una serie de elementos que se comunican entre sí, dónde la salida de un LPE es expresada en los términos de los parámetros de entrada del siguiente LPE. Con este patrón se dividen las responsabilidades de cada LPE, generando una mayor especialización de cada uno.

6.1.3 Procesamiento Léxico

Los lenguajes de propósito específico tienen varias restricciones para la realización de su diseño e implementación, siendo este patrón una solución eficiente a este problema. La finalidad del patrón de procesamiento léxico es mediante técnicas de sustitución léxica producir una traducción que permita realizar un procesamiento de una forma más ajustada a las necesidades de los usuarios. Con este patrón se pretende reducir los costos de implementación de un nuevo lenguaje.

6.1.4 Extensión del Lenguaje

El patrón de Extensión del Lenguaje es utilizado para adicionar nuevas características y propiedades a un lenguaje existente. Se extiende la semántica y

la sintaxis del lenguaje base adicionando nuevos elementos. De esta forma, el desarrollador del nuevo lenguaje no debe preocuparse por diseñar el paquete completo de características del lenguaje.

6.1.5 Especialización del Lenguaje

Este patrón es contrario al descrito anteriormente, porque consiste en remover características de un lenguaje base para la creación de uno nuevo. Lo que se busca con este patrón es remover ciertos elementos del lenguaje base que puedan generar inconsistencias o inseguridades en aplicaciones que pretenden solucionar problemas específicos.

6.1.6 Transformación de código a código

Como su nombre lo indica, este patrón consiste en traducir el código del nuevo lenguaje a un lenguaje base, cuando las restricciones para la creación de lenguajes de propósito específico no posibiliten la implantación de patrones como Piggyback, Especialización o Extensión de Lenguajes. El código traducido es compilado y traducido utilizando como host las herramientas del lenguaje base.

6.1.7 Representación de Estructuras de Datos

Este patrón es utilizado cuando se necesita la representación de estructuras de datos con gran complejidad, y los elementos disponibles en un lenguaje dificultan la implementación de estas estructuras de datos, haciendo ineficientes las aplicaciones que se necesitan desarrollar. Con la utilización de este patrón se evita inconsistencias en la información con que se inicializan estas estructuras.

6.1.8 Sistema Front-end

Este patrón consiste en establecer configuraciones programables de las múltiples opciones que ofrecen la mayoría del Software, evitando que el usuario deba realizarlas y no le genere complicaciones en el manejo del Software y su funcionalidad. De esta manera, el patrón provee al usuario un mecanismo organizado y declarativo automático de la configuración de las opciones del Software que maneja.

6.2 Diseño del Lenguaje

El programa EPANET es un software de referencia para la gran variedad de programas comerciales que se encuentran en el mercado para la modelación de redes de distribución de agua potable. De esta forma, los archivos e implementaciones nuevas del programa REDES tienen que ser compatibles con EPANET, y ya que este último posee un pequeño lenguaje de propósito específico, será el punto de partida para el diseño del Lenguaje.

El primer patrón en utilizarse es Procesamiento Léxico, porque se desea traducir el código en inglés a español. El formato y sintaxis del lenguaje de EPANET se presenta en la siguiente numeral.

6.2.1 Lenguaje EPANET

6.2.1.1 Control

6.2.1.1.1 Propósito

Define controles simples que modifican los enlaces (Tubos, Bombas y Válvulas) basados en una sola condición.

6.2.1.1.2 Sintaxis

LINK enlaceID estado **IF NODE** nodoID **ABOVE/BELOW** valor

LINK enlaceID estado **AT TIME** tiempo

LINK enlaceID estado **AT CLOCTIME** tiempo **AM/PM**

donde:

enlaceID	=	identificador del enlace
estado	=	OPEN o CLOSED, velocidad de la bomba configuración de la válvula
nodoID	=	identificador de la unión.
valor	=	presión para un nodo o nivel en el tanque
tiempo	=	tiempo transcurrido desde el inicio de la simulación

6.2.2 Lenguaje de Comandos

El lenguaje desarrollado tiene la finalidad de ser utilizado principalmente para realizar ediciones sobre la red, como por ejemplo inserción de elementos o modificación de sus propiedades por medio de comandos. Siendo un lenguaje de mayor interacción con el usuario, se utilizó el patrón Front-End en el diseño del lenguaje.

La utilización de comandos tiene mayor familiarización con los usuarios debido al uso que los ellos hacen de software CAD (Diseño Ayudado por Computador por su sigla en inglés) en complemento a los programas de modelación de redes de distribución de agua, para el manejo de planos y de información geográfica.

6.2.2.1 Sintaxis

La sintaxis de los comandos es muy sencilla y está dividida en dos partes; la primera corresponde al nombre del comando, y la segunda parte corresponde a los parámetros del comando que puede variar entre 0 y tantos parámetros necesite el comando.

6.2.2.1.1 Estructura

[Nombre del Comando] [Parámetro]

6.2.2.1.2 Ejemplos

Se presentará un ejemplo de la sintaxis de los comandos para la manipulación de los elementos de la red y la transformación del lenguaje de epanet

```
ADD_TUBO T1 N1 N2
```

La primera palabra corresponde al nombre del comando, y las siguientes palabras corresponden a los parámetros, identificador del tubo, nodo inicial y nodo final respectivamente.

```
CONTROL_TUBO T1 CERRADO CONDICION N1 LGH SUPERIOR 30
```

Este comando tiene un número variable de parámetros que depende de la función que se quiera realizar con el comando. En este caso se necesitaron de 7 parámetros para establecer que el elemento Tubo con identificador Tubo1 se debe cerrar cuando se cumpla la condición sobre la unión Nodo1 de presión mayor a 30. Se aprecia la transformación de la sintaxis en la línea de código del lenguaje

de Epanet, ya que se definió en código el tipo de enlace sobre el que se quiere ejercer control, a diferencia de cómo estaba antes que era en tiempo de ejecución.

6.3 Arquitectura del Lenguaje

La Arquitectura del Lenguaje consta de 4 componentes; la interfaz gráfica que se encarga de la entrada del código y llama al Parser para que se encargue de procesar el código y validar su sintaxis. Una vez validado el código ingresado, el componente ControlComando crea el comando indicado y le pasa la lista con los argumentos necesarios para su ejecución. Todos los tipos de comando deben implementar una interfaz que establece dos métodos esenciales, SetParametros y Execute. A continuación se presenta el esquema de la Arquitectura del Lenguaje desarrollado.

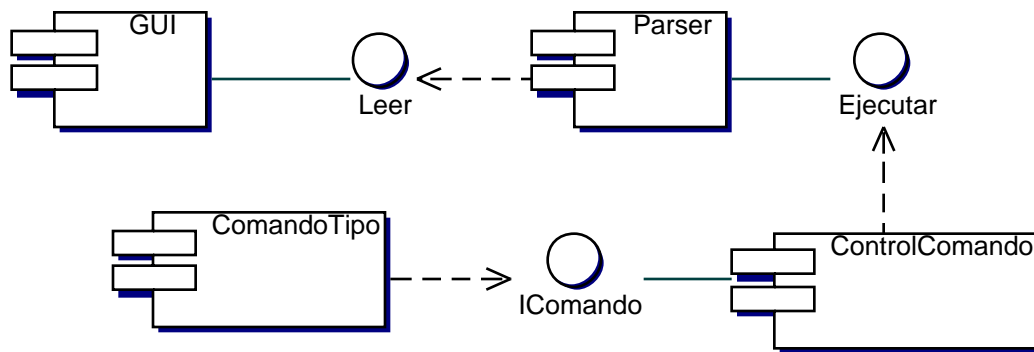


Figura 26 Arquitectura del Lenguaje

6.4 Alcance del Lenguaje

El lenguaje desarrollado está diseñado con el fin de ofrecer al usuario la opción de realizar operaciones a través del teclado y crear reglas de control durante la ejecución del cálculo hidráulico en período extendido.

Con el lenguaje se busca que se puedan crear elementos de la red, cambiar propiedades de los elementos, realizar selecciones, crear grupos y realizar acercamientos o alejamientos de la red. Se pretende que los usuarios que mayor uso y conocimiento tengan del programa REDES puedan realizar todas las operaciones anteriormente descritas de manera automática, es decir, con el menor uso posible del Mouse, aumentando el rendimiento y eficiencia del trabajo que se desarrolle con el software.

La estructura y arquitectura del lenguaje se encuentra definida, pero su completa implementación se deja como trabajo futuro, para induir comandos de familiaridad con los usuarios.

El lenguaje se encuentra implementado tomando como host el lenguaje de programación Delphi, utilizando el patrón PiggyBack, porque se utilizan los procesos de compilación para la ejecución del nuevo lenguaje. Parte de la implementación que se desarrolló corresponde a la traducción del lenguaje de EPANET, pero con una mayor utilidad ampliando el alcance y aplicación, es decir, realizando una Extensión del Lenguaje.

6.5 Gramática del Lenguaje

En este numeral se presenta la gramática de cada comando que se encuentra actualmente implementado en el programa REDES. Adicionalmente se adiciona una breve explicación de la función que desempeña cada comando. Como se mencionó anteriormente, la mayor parte del lenguaje que está implementado corresponde a los comandos con función en crear reglas de control, por su importancia en el trabajo central de la tesis y porque su utilización no requiere de una consola de lectura e ingreso del lenguaje.

```
CONTROL_TUBO T1 CERRADO CONDICION UNION U1 INFERIOR 30
CONTROL_TUBO T1 CERRADO CONDICION NODO U1 INFERIOR 15
CONTROL_TUBO T1 ABRIERTO CONDICION TANQUE U1 SUPERIOR 20
```

Para el comando CONTROL_TUBO con 6 parámetros, el cuarto parámetro indica que tipo de variable se debe cumplir para cerrar el tubo. Si es UNION se verifica el LGH en metros, si es NODO se verifica la presión en M.C.A y si es TANQUE se verifica el nivel en metros. Como se indicó previamente, el código indica sobre que tipo de enlace se esta haciendo el control. Se extiende el lenguaje para poder crear reglas de control sobre los nodos de la red, en la modelación de calidad agua. Estas reglas sobre los nodos se presentarán después de terminar las reglas de control sobre los enlaces.

```
CONTROL_TUBO T1 ABRIERTO TIEMPO 6:00
CONTROL_TUBO T1 CERRADO TIEMPO 17:00
```

Esta vez el comando CONTROL_TUBO tiene 4 parámetros y solo depende del tiempo de simulación transcurrido, en la hora 6:00 se abre el tubo, y en la hora 17:00 se cierra el tubo. El comando, por si mismo debe reconocer que tipo de parámetros le están pasando y debe saber como procesarlos.

```
CONTROL_VALVULA V1 CUADAL 15 CONDICION UNION U1 30
CONTROL_VALVULA V1 PRESION 15 CONDICION NODO U1 15
```

El comando CONTROL_VALVULA establece en el segundo parámetro el tipo de configuración que se desea cambiar. El cambio en la configuración depende del tipo de válvula al que referencia el identificador, si no corresponde el tipo de válvula, simplemente no se realiza el control. La parte de la condición es igual que la explicada para el comando CONTROL_TUBO. Para las variables de CAUDAL la unidad es Litros por segundo, y para PRESION la unidad es M.C.A.

```
CONTROL_VALVULA V1 CUADAL 15 TIEMPO 8:00  
CONTROL_VALVULA V1 CAUDAL 10 TIEMPO 12:00
```

En esta ocasión el comando CONTROL_VALVULA contiene 5 parámetros. Su funcionamiento es igual que para CONTROL_TUBO.

```
CONTROL_BOMBA B1 APAGADA CONDICION UNION U1 SUPERIOR 30  
CONTROL_BOMBA B1 ENCENDIDA TIEMPO 6:00
```

Al igual que los comandos anteriores el comando CONTROL_BOMBA modifica el estado de la bomba a ENCENDIDA o APAGADA, por condición o por tiempo. El estado en la bomba no se encontraba implementado, por lo que siempre se encontraba encendida, y no se podía modelar el compartimiento que tienen durante el día. Se modificó la implementación de la bomba y se adicionó el estado.

```
CONTROL_NODO N1 CLORO 1 CONDICION N1 0.2  
CONTROL_NODO N 1 CLORO 1 TIEMPO 6:00 6:30
```

En el comando CONTROL_NODO solo se permite la adición del doro o cualquier otra sustancia que se quiera modelar. Por esto no se tiene un parámetro de comparación SUPERIOR o INFERIOR, ya que se supone que solo se adicionará una sustancia si la concentración cae por debajo de cierto valor para un nodo determinado. La adición de la sustancia también se puede hacer para un intervalo de tiempo, por eso se tienen dos horas como parámetros. En este comando el número de parámetros no especifica que como deben ser procesados los parámetros del comando, es con base al parámetro cuarto que se puede definir.

Los comandos adicionales que se implementaron para la edición de la red, no se describen en la tesis, por no estar relacionados directamente con el tema central. Además se necesita una consola diferente para la entrada del lenguaje, con una mayor complejidad que el desarrollado para los comandos de reglas de control.

7 Resultados

En este capítulo se recopilan los resultados de pruebas al módulo implementado para la modelación de la calidad de agua en redes de distribución de agua potable. Se realizaron las pruebas sobre redes reportadas en la literatura con los resultados obtenidos de la sustancia modelada. También se modelaron redes de acueducto estudiadas en el Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de Los Andes (CIACUA); estas redes son teóricas para un fácil entendimiento del comportamiento sobre nuevas investigaciones que se realizan en el centro de investigación, y redes de acueducto reales de municipios de Colombia, con las que se han trabajado en consultoría por parte del mismo centro de investigación.

Las redes reportadas en la literatura tienen resultados con base en la ecuación de fricción de Hazen-Williams, diferente a la ecuación que se utiliza en el módulo de cálculo hidráulico del programa REDES; por este motivo se permite un pequeño margen de diferencia en los resultados arrojados por el módulo implementado de calidad de agua en período extendido, ya que los caudales en las tuberías pueden variar un poco por la utilización de ecuaciones diferentes.

Los resultados obtenidos del módulo de calidad de agua con redes estudiadas en el CIACUA son comparadas, con resultados arrojadas en el programa EPANET, el cual es muy utilizado en la literatura para probar la aplicabilidad de modelos planteados en calidad de agua.

7.1 Pequeña Red de Distribución

Esta red de distribución es utilizada por varios autores para realizar las primeras pruebas sobre sus métodos y modelos de simulación de la calidad de agua, entre ellos Lewis Rossman, autor del programa EPANET. A continuación se muestra la información topológica de la red.

NODOS		
ID	Elevación	Demanda
-	m	lps
1	24.4	63.1
2	25.9	75.8
3	36.6	50.5

Tabla 1 Topología de los nodos

EMBALSES		
ID	LGH	Concentración
-	m	mg/l
A	82.3	100
B	88.4	200
C	76.2	300

Tabla 2 Topología de los embalses

TUBOS					
ID	NODO1	NODO2	LONGITUD	DIAMETRO	RUGOSIDAD
	-	-	m	mm	m
1	1	4	610	203	1.50E-06
2	4	5	732	152	1.50E-06
3	5	3	305	203	1.50E-06
4	5	6	1220	152	1.50E-06
5	4	6	366	152	1.50E-06
6	2	6	610	203	1.50E-06

Tabla 3 Topología de los Tubos

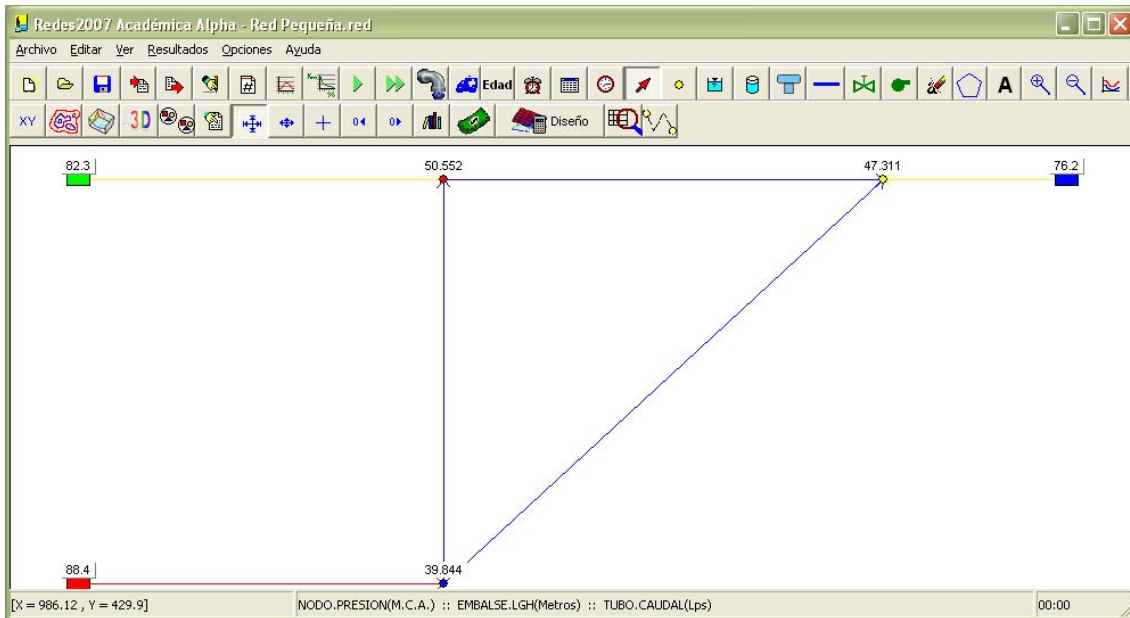


Figura 27 Red Pequeña de Ejemplo

El constituyente que se quiere modelar es conservativo, no presenta ninguna reacción. Se observa en las gráficas que las concentraciones son muy parecidas para los 3 nodos.

Fueron muy satisfactorios los resultados arrojados por el módulo de calidad de agua para modelar una sustancia conservativa en una red con tres fuentes con diferente concentración.

En las gráficas las series que contengan en su nombre la palabra REDES, son las series de los resultados que se obtuvieron en el módulo de calidad de agua, tanto

para esta red como las otras redes descritas más adelante. En la mayoría de los casos es difícil visualizar las series de EPANET y del módulo implementado en el programa REDES para un mismo punto, porque los datos son tan similares que se transpone una serie con la otra.

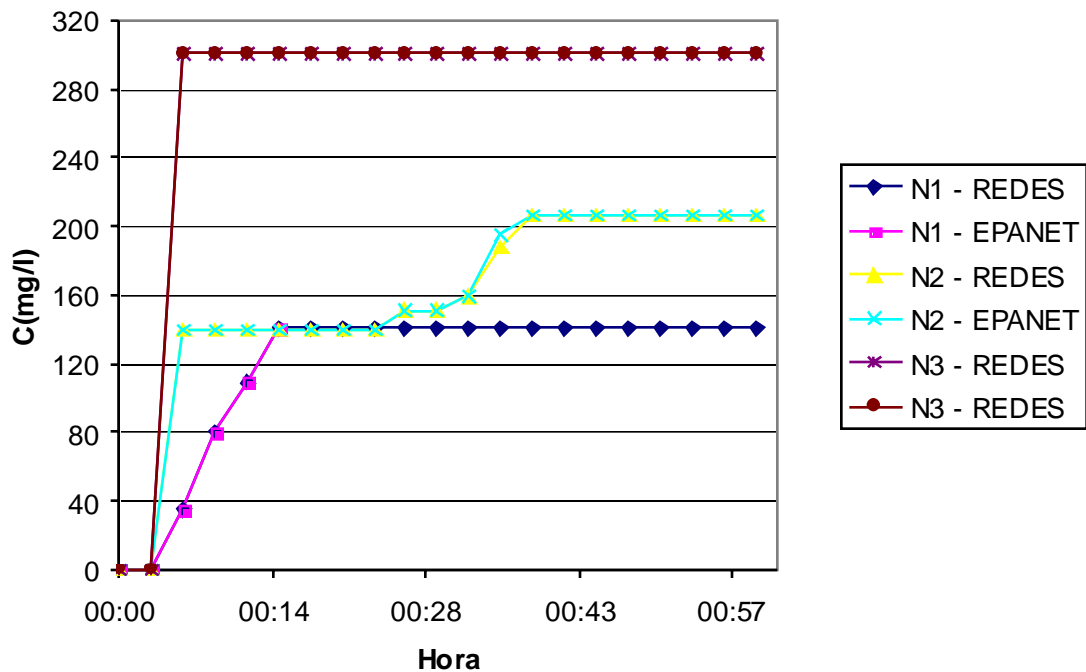


Figura 28 Concentración en lo nodos en el tiempo

7.2 R28

La red R28 es una red teórica creada en el CIACUA para pruebas de nuevas investigaciones en el campo de diseño, calibración y calidad de agua. Esta red consta 28 circuitos de tuberías, tiene un total de 67 tubos, 39 nodos y un embalse ubicado en el centro de la red. Por ser una red de mayor tamaño solo se presenta la imagen de la red.

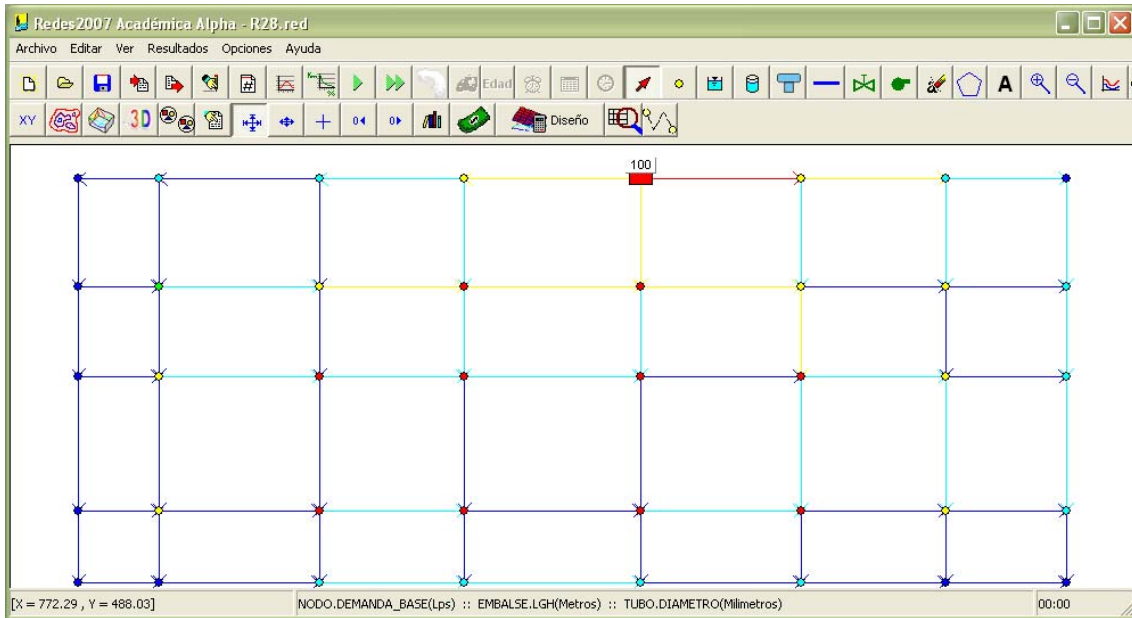


Figura 29 Red R28

Las demandas en los nodos son mayores en el centro de la red y van disminuyendo hacia los extremos. El LGH del embalse es 100 m y la red no presenta topografía, es decir, todos los nodos tienen elevación igual a cero. La sustancia modelada es cloro con una concentración inicial en el embalse igual 1 mg/l. Se asume un coeficiente de pared de -0.15 m/día y un coeficiente de masa de agua de -0.55 1/día para todos los tubos de la red. También se modelará la Edad del agua en cada nodo de la red. Los resultados se compararon con el programa EPANET.

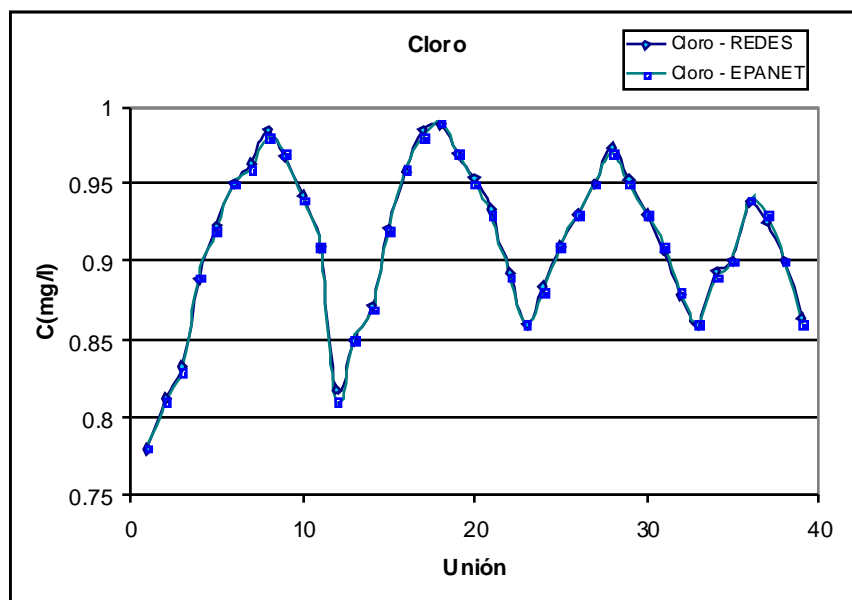


Figura 30 Concentración de Cloro en las Uniones en el tiempo 13:30

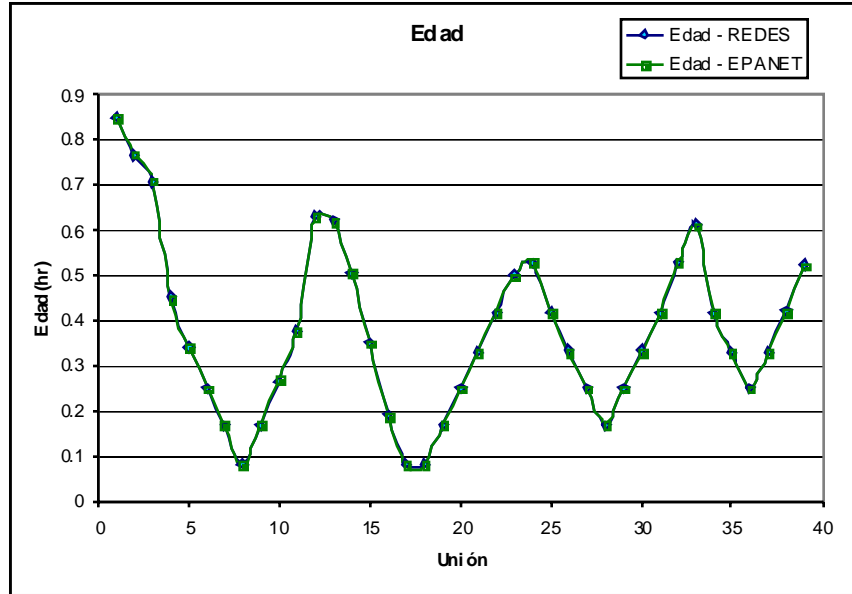


Figura 31 Edad en la Uniones en el tiempo 16:30

Los resultados obtenidos son muy parecidos a los resultados arrojados en el programa EPANET. El desempeño del programa REDES en esta prueba fue muy satisfactoria.

7.3 Red R28 con Tanque

Esta red es muy similar a la anterior, pero se reemplaza el tanque por el embalse y se alimenta a través de otro embalse. Se tienen dos casos para las diferentes tipos de mezclas en el tanque. Sólo se presentará el tipo de mezcla para un solo compartimiento y dos compartimientos. El nivel inicial en el tanque es de 20 m, un diámetro de 20 m y una elevación de 15 m. El embalse que alimenta al tanque tiene un LGH de 35 m.

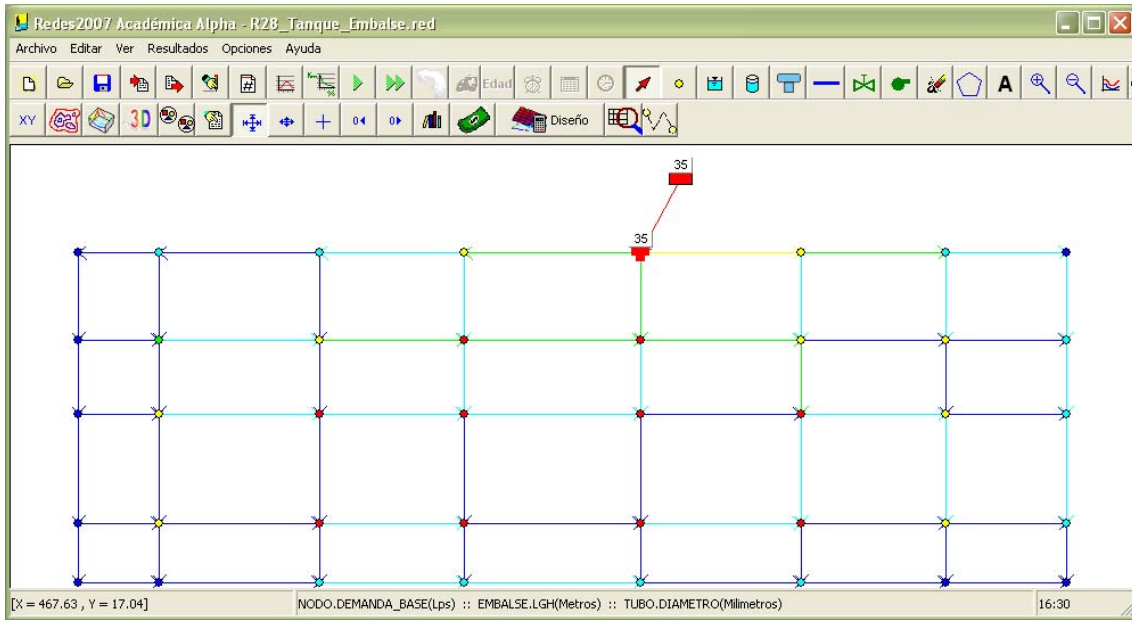


Figura 32 Red R28 con Tanque

Los resultados que fueron comparados son el nivel del tanque a través del tiempo, ya que este elemento se adicionó al programa REDES. Se tenían elementos Tanques pero con características diferentes al Tanque modelado en Epanet. Se revisará la concentración de Cloro y la Edad del agua en los tanques para los dos tipos de mezcla en los tanques.

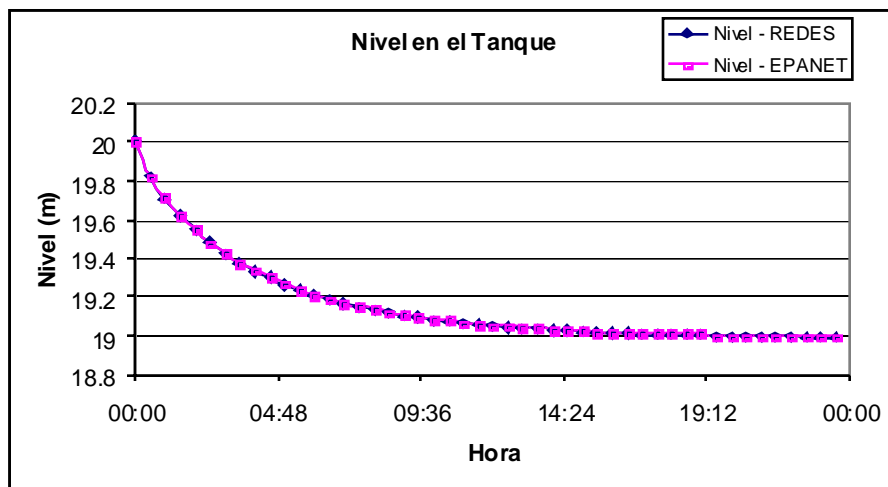


Figura 33 Variación del nivel del Tanque

Una vez revisada la precisión y confiabilidad en los resultados hidráulicos de la nueva modelación del elemento en la red, se realizaron las pruebas para cada tipo de mezcla. Se conservan los mismos parámetros para los tubos. La concentración en el embalse es 1 kg/l. El coeficiente de reacción por masa de agua en el tanque es -0.42 1/día.

7.3.1 Un solo compartimiento

Los resultados obtenidos tanto para el cloro como la edad en el tanque son excelentes, con diferencias mínimas en cada tiempo. La prueba para este tipo de mezcla es muy satisfactoria.

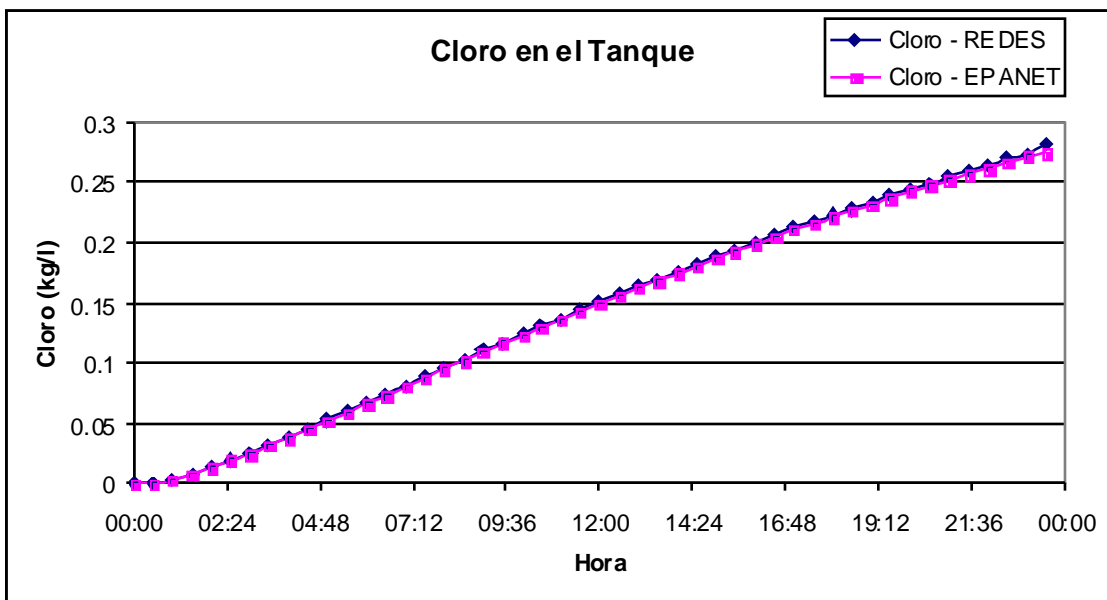


Figura 34 Cloro en el Tanque con un solo compartimiento

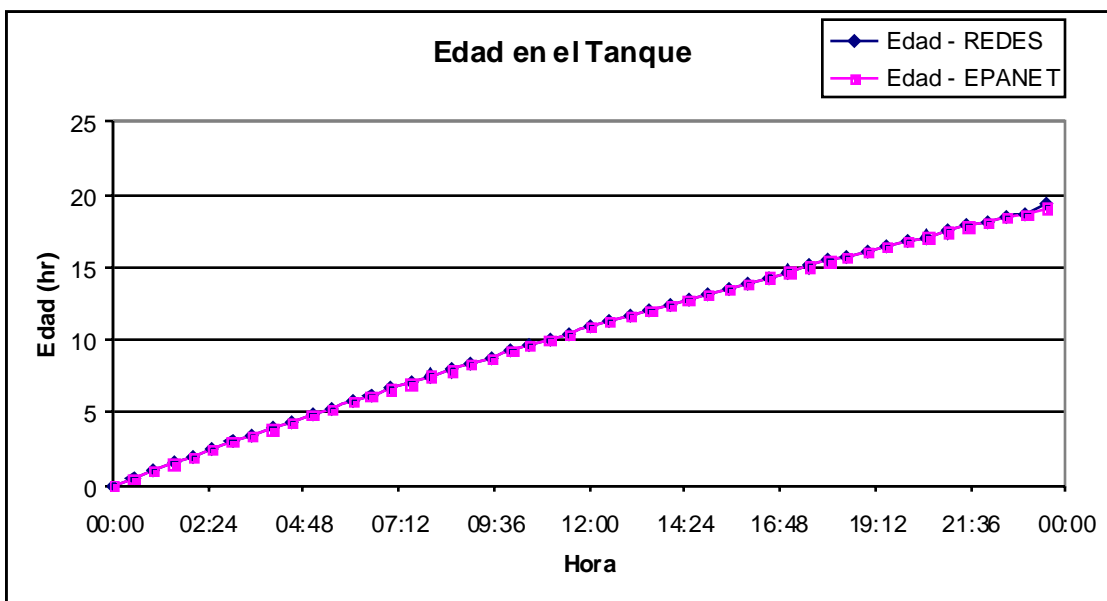


Figura 35 Edad en el Tanque con un solo compartimiento

7.3.2 Dos compartimientos

En la modelación de la concentración de cloro y la edad en el agua almacenada en el tanque con 2 compartimientos se supone un porcentaje de 40% para el volumen máximo del compartimiento A del volumen total del tanque. Los resultados obtenidos con el módulo implementado de calidad de agua del programa REDES son excelentes en comparación con los resultados de EPANET. La prueba para mezclas con dos compartimientos es muy satisfactoria.

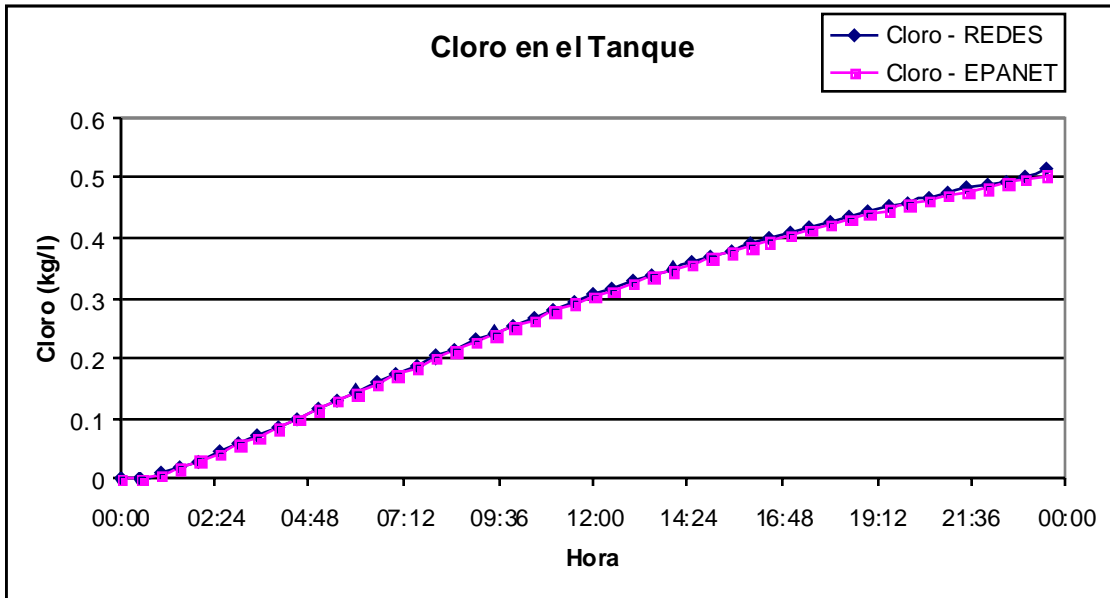


Figura 36 Cloro en el Tanque con 2 compartimientos

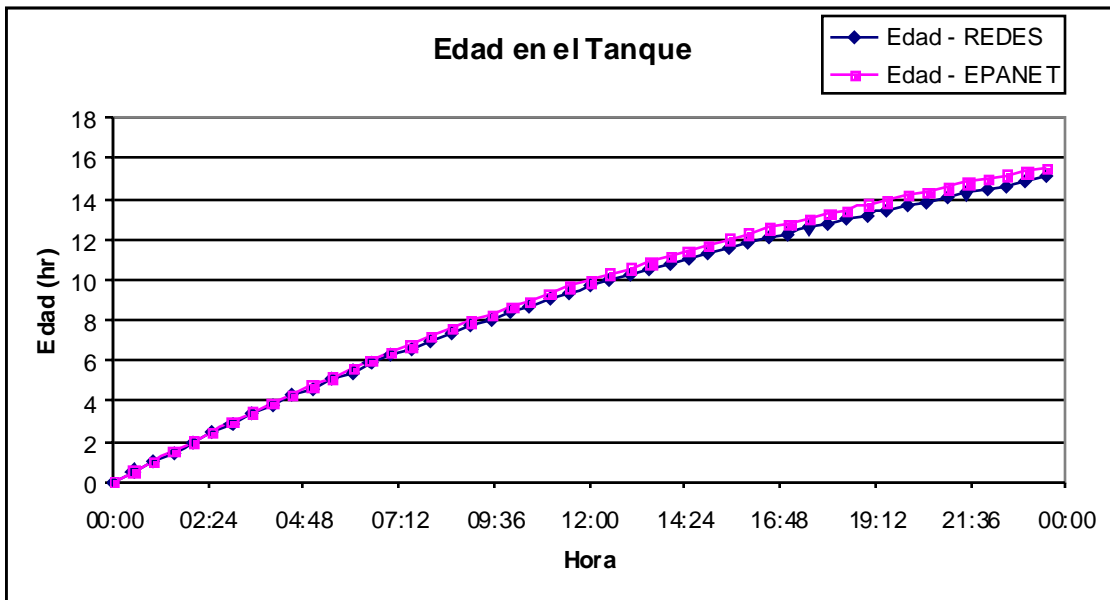


Figura 37 Edad en el Tanque con 2 compartimientos

7.4 Ginebra

La red de Ginebra es una red del Departamento del Valle, y esta bajo la administración de la Empresa Acuavalle. El CIACUA ha trabajado ofreciendo consultoría sobre esta red en la operación y calibración de la red de acueducto. Lo interesante de la red es que tiene dos embalses que abastecen al sistema de distribución, y presenta una topografía marcada.

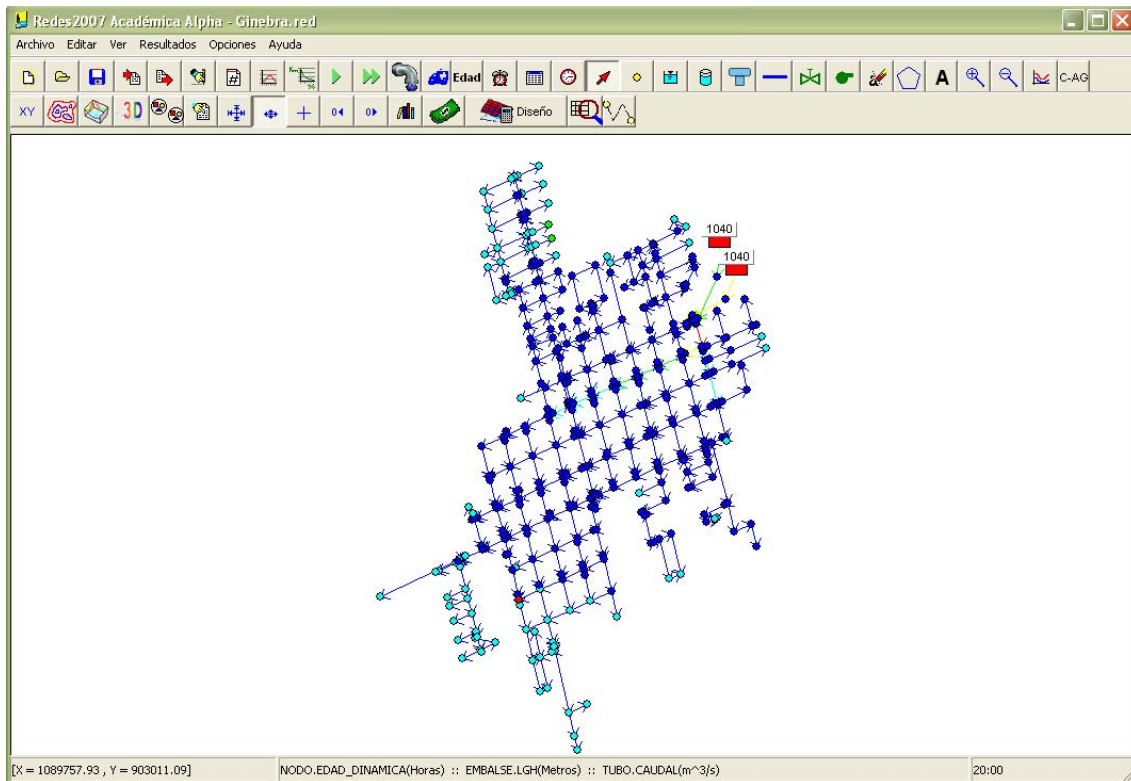


Figura 38 Red de Ginebra, Departamento del Valle.

Los resultados obtenidos de concentración de cloro y edad del agua en los nodos para la validación de la precisión en redes reales es realizada solamente para 2 nodos seleccionados aleatoriamente sobre la red, debido a que los identificadores de los nodos y las concentraciones son muy dispersos y el gráfico no se puede observar claramente.

La topografía de la red varía de 1020 m.s.n.m y 1030 m.s.n.m.. Los embalses tienen un LGH 1040 cada uno. Se le asigna un valor de concentración de cloro diferente a cada embalse, 0.9 kg/l y 1.1 kg/l para acercarse más a lo que sucede en la realidad, donde diferentes fuentes de suministro de agua contienen distinta calidad de agua.

Las gráficas de las concentraciones y edades en los nodos 68 y 168 se muestran a continuación.

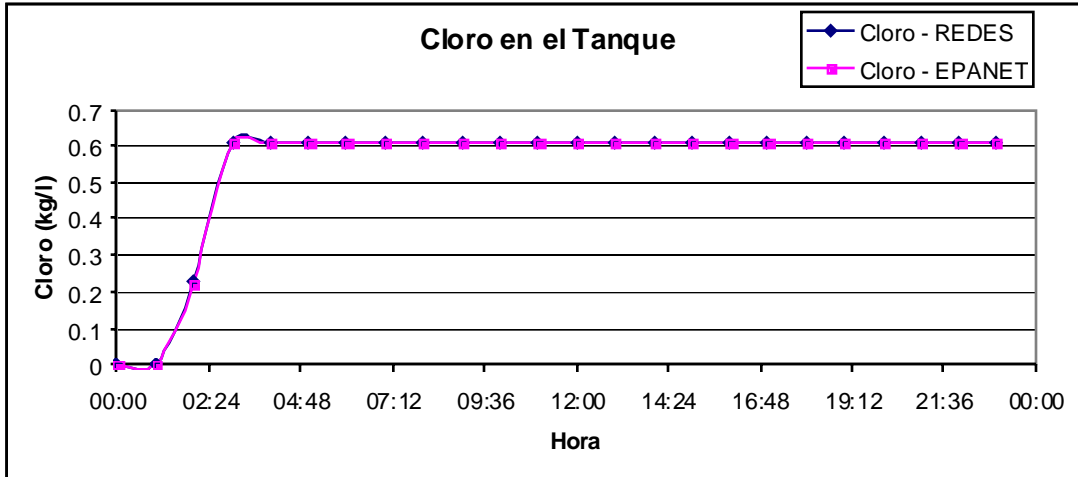


Figura 39 Cloro en el nodo 68

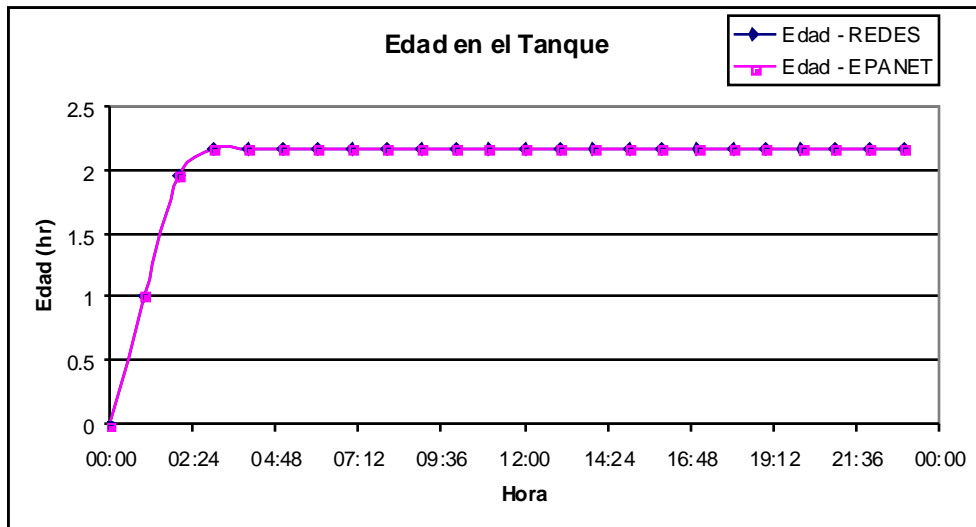


Figura 40 Edad en el nodo 68

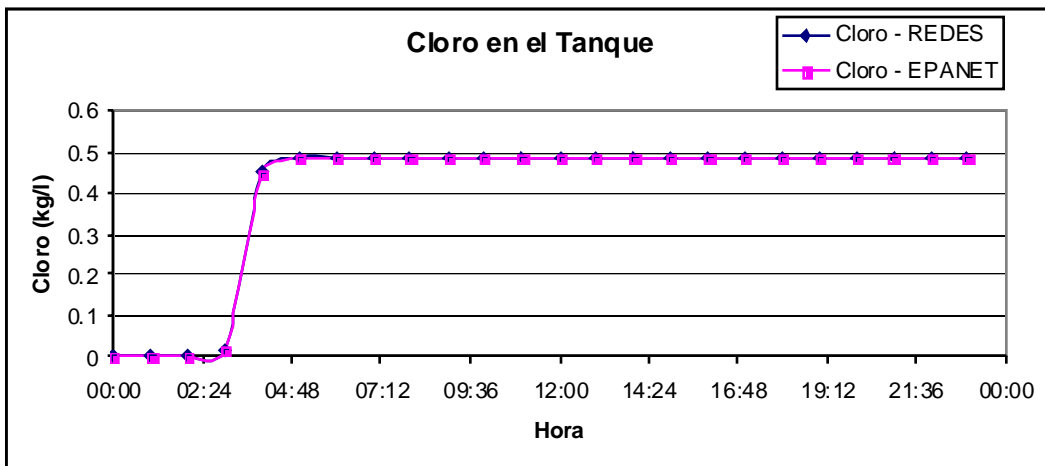


Figura 41 Cloro en el nodo 168

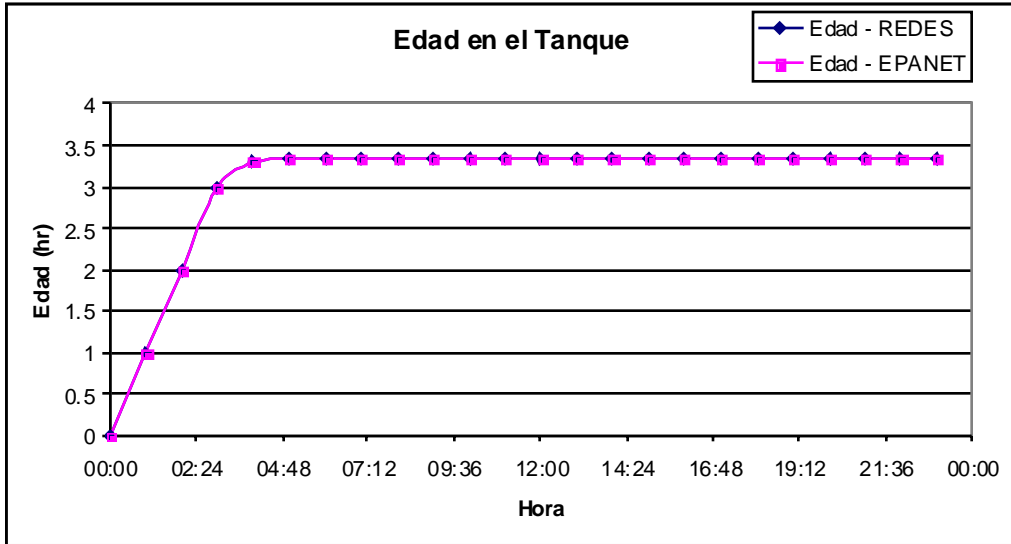


Figura 42 Edad en el nodo 168.

Los resultados obtenidos para una red real de un municipio en el módulo de calidad de agua del programa REDES fueron muy parecidos a los resultados obtenidos con el programa EPANET. La prueba fue satisfactoria.

7.5 Tiempos de Ejecución

En esta sección se realiza una comparación de los tiempos de ejecución en la modelación de la calidad de agua del módulo implementado para el programa REDES comparados con los tiempos de ejecución del programa EPANET que es actualmente el software con mayor velocidad en los cálculos hidráulicos y calidad de agua.

El programa REDES está desarrollado sobre el lenguaje de programación Delphi 6.0 y el programa EPANET esta desarrollado en el lenguaje C++, por este motivo se presenta también el tiempo de ejecución de cálculo hidráulico en período extendido para una duración de 24 horas, con intervalos de una hora, para situar en contexto las diferencias que se encuentran en tiempo de ejecución entre ambos programas.

En la siguiente tabla se presenta los tiempos de la modelación de calidad de agua para una sustancia para diferentes redes.

Red	Número Tubos	REDES		EPANET	
		Tiempo Hidraulico	Tiempo Calidad Agua	Tiempo Hidraulico	Tiempo Calidad Agua
		ms	ms	ms	ms
Bucaramanga	5300	568'218	16'573	11'030	5'204
Ginebra	500	5'403	1'280	903	803
R28	70	437	312	201	187

Figura 43 Comparación de los tiempos de ejecución para una sustancia

En la siguiente tabla se presenta los tiempos de la modelación de calidad de agua para cuatro sustancias simultáneamente para diferentes redes.

Red	Número Tubos	REDES		EPANET	
		Tiempo Hidraulico	Tiempo Calidad Agua	Tiempo Hidraulico	Tiempo Calidad Agua
		ms	ms	ms	ms
Bucaramanga	5300	568'218	21'060	11'030	20'920
Ginebra	500	5'403	1'450	903	32'12
R28	70	437	462	201	748

Figura 44 Comparación de los tiempos de ejecución para cuatro sustancias

En ambas tablas se aprecia que la única diferencia sustancial se presenta cuando se corre la modelación de calidad de agua para una red de acueducto suficientemente grande. El orden de diferencia entre EPANET y REDES es de 1 a 3 respectivamente. Esta diferencia en tiempo es compensada cuando se realiza la modelación de cuatro sustancias. A pesar que el programa EPANET es más veloz en la modelación de la calidad de agua, el módulo implementado presenta una gran rapidez con tiempo de ejecución pequeño.

8 Conclusiones

La aplicación desarrollada en esta tesis posiciona al programa redes al mismo nivel de los programas comerciales de modelación de sistemas de agua potable de distribución que se encuentran en el mercado nacional e internacional, ofreciendo una interfaz gráfica más amigable al usuario y fácil de usar.

Las múltiples opciones y gran velocidad de cálculo hacen del módulo de calidad de agua implementado una herramienta de gran uso en la operación y control de las entidades encargadas de manejar las redes de acueducto de las ciudades y municipios.

El módulo de calidad de agua implementado es una herramienta de apoyo a la investigación sobre el tema de calidad de agua para la modelación de sustancias relevantes en la calidad de agua y por ende en la salud de las personas que consumen el agua directamente de las llaves de las casas. El módulo permite que profesionales y expertos diferentes al área de ingeniería de software puedan trabajar y mejorar los alcances del módulo, debido a que la flexibilidad y extensibilidad con que fue diseñado e implementado el módulo de calidad de agua ofrece la posibilidad de adiciones de nuevos componentes que amplíen el número de sustancias que se puedan modelar en la red.

Los resultados obtenidos del módulo de calidad de agua son muy similares a los del programa EPANET, y el motivo para preferir el uso del programa REDES para la modelación de calidad de agua, en adición a las razones descritas en el párrafo anterior radica, en que el módulo de calidad de agua desarrollado se ajusta a las necesidades y requerimientos de las empresas encargadas de los acueductos de Colombia. Además, con la fácil inclusión y modificación de las ecuaciones que describen el comportamiento de las sustancias que se quieren modelar, permite que estas ecuaciones se ajusten al medio y ambiente característico del territorio Colombiano.

El lenguaje de propósito específico fue desarrollado para que su aprendizaje y utilización fuera muy fácil. Con este lenguaje se ofrece que los usuarios puedan modelar las acciones que realmente están pasando en los acueductos colombianos. Adicionalmente, se pretende que su futura implementación acerque más el programa REDES a una herramienta CAD (Diseño Asistido por Computador, por su sigla en inglés).

La suposición de concentraciones iniciales de una sustancia en los nodos de la red, puede alterar la precisión de los resultados obtenidos de la red en los primeros períodos de la simulación debido a que para estos períodos el agua proveniente de las fuentes donde se conoce la concentración no ha llegado a la mayoría de los nodos, y las concentraciones para estos nodos y los nodos aguas

abajo son obtenidos con base a la suposición inicial. Muchos autores en el tema de modelación de calidad de agua en período extendido recomiendan realizar la simulación para varios días, bajo las mismas condiciones hidráulicas, de manera que se obtengan concentraciones iniciales en los nodos entre una simulación y la siguiente muy parecidas. Este procedimiento es dispendioso y requiere una suposición de varios días de simulación, para asegurar la convergencia a un valor de concentración inicial en los nodos de la red, requiriendo varias iteraciones y tiempo de ejecución para obtener resultados con precisión. Con el módulo de calidad de agua implementado para el programa REDES se evita realizar la suposición de los días de simulación, ya que se ofrece la opción de estimar primero la calidad inicial en los nodos antes de realizar la simulación.

Los diferentes tipos de mezclas en los tanques afectan la concentración de la sustancia y la edad del agua almacenada. Los resultados para los tanques con dos compartimientos, se mostraron para el compartimiento A donde la concentración aumenta más rápido y la edad del agua aumenta a una menor tasa. Sin embargo, no se muestra la calidad del agua para el compartimiento B que es donde realmente se deteriora y modela zonas muertas en los tanques. En el módulo implementado de calidad de agua la visualización de la calidad de agua para los diferentes compartimientos del tanque esta desarrollado, ofreciendo una mejor concepción de la interacción del agua con los diferentes agentes que pueden deteriorar su calidad.

La modelación de la calidad inicial para los tanques se hace de manera independiente en el módulo de calidad de agua, ya que estos permiten el almacenamiento de los volúmenes de agua que llegan al tanque, y por estar al principio de las fuentes de suministro de agua potable, no afecta la estimación de los nodos de la red.

Ambos algoritmos de recorrido para el cálculo de la calidad de agua fueron muy eficientes. Los tiempos de cálculo fueron muy pequeños, un par de segundos para redes de distribución con un número de tubos mayores a 500 tubos.

El algoritmo de recorrido con ordenamiento puede utilizarse para la estimación de la calidad inicial en los nodos de la red, por lo que el cálculo es parecido a la ejecución de un trazador.

La utilización del módulo de calidad de agua implementado en el programa REDES ofrece mayor flexibilidad al uso y necesidades de cada tipo de usuario de programas de modelación de redes de distribución de agua potable.

Los tiempos de modelación de la calidad de agua para diferentes sustancias en las redes de distribución de agua potable es mucho menor, y los resultados para cada sustancia están disponibles todo el tiempo, sin que estos resultados se eliminen cada vez que se quiera modelar una nueva sustancia.

La inclusión de nuevas ecuaciones sin modificación de las clases ya implementadas en el módulo de calidad de agua, que describan el

comportamiento de las reacciones de nuevas sustancias o de sustancias con su componente de cálculo de reacción ya implementado.

El lenguaje de propósito específico mejora la modelación tanto hidráulica como de calidad de agua, ofreciendo la posibilidad del estudio de diferentes casos que se pueden presentar en las redes de acueducto, para la toma de decisiones y estrategias de optimización de costo y eficiencia del suministro de desinfectante residual.

El manejo y la interfaz gráfica del módulo de calidad de agua son muy amigables al usuario, por lo que el conocimiento y entendimiento sobre las diferentes opciones que se ofrecen es casi intuitiva. Con esto se maximiza el uso de todas las opciones y que los resultados que arroje el módulo de calidad de agua sea lo que el usuario desee obtener.

9 Bibliografía

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.

P.F. Boulous, K. E. Lansey, B. W. Karney. *Comprehensive Water Distribution Systems Analysis Handbook for Engineers and Planners*. [En Línea]. Disponible: http://www.mwhsoft.com/page/p_bookstore/chwqa/Chap4dload.pdf

L.A. Rossman, P.F. Boulous (1996, Marzo). *Numerical Methods For Modeling Water Quality in Distribution Systems: A comparison*. Revista Journal of Water Resources Planning and Management. [En Línea].

L.A. Rossman, P.F. Boulous, T. Altman (1994, Febrero). *Discrete Volume-Element Method for Network Water-Quality Models*. Revista Journal of Water Resources Planning and Management. [En Línea]. 119, (5).

R.E. Mass, P.F. Boulous, R.M. Clark, W.M. Grayman, R.J. Tekippe, R.R. Trussell (1995, Octubre). *Explicit Mathematical Models of Distribution Storage Water Quality*. Revista Journal of Hydraulic Engineering. [En Línea].

R.M. Clark, F. Abdesaken, P.F. Boulous, R.E. Mass (1996, Septiembre). *Mixing in Distribution System Storage Tanks: Its Effect on Water Quality*. Revista Journal of Environmental Engineering. [En Línea].

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).

L.A. Rossman, W.M. Grayman (1999, Agosto). *Scale-Model Studies of Mixing in Drinking Water Storage Tanks*. Revista Journal of Environmental Engineering. [En Línea].

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].