

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Modelación de redes de distribución de agua con suministro intermitente.
<i>Autor / Adscripción</i>	José Antonio Cabrera-Béjar Universidad Nacional Autónoma de México  Velitchko Gueorguiev Tzatchkov Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<i>Publicación</i>	Tecnología y Ciencias del Agua, 3(2): 5-25
<i>Fecha de publicación</i>	2012
<i>Resumen</i>	El suministro intermitente, con frecuencia se presenta en países en vías de desarrollo. La inequitativa distribución del agua, la posible contaminación, las pérdidas, los costos adicionales que se generan para los consumidores y abastecedores del agua, el mal funcionamiento de las redes y la inconveniencia de los usuarios, son algunas de las consecuencias indeseables más comunes que provoca el suministro intermitente. En este artículo se propone y ejemplifica el uso de modelos de redes que son conocidos y del dominio público, como el SWMM, para el llenado inicial y vaciado posterior de redes de agua, y el EPANET, para modelar redes con operación intermitente.
<i>Identificador</i>	<a href="http://hdl.handle.net/123456789/1296">http://hdl.handle.net/123456789/1296</a>

# MODELACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA CON SUMINISTRO INTERMITENTE

• José Antonio Cabrera-Béjar •  
*Universidad Nacional Autónoma de México*

• Velitchko Gueorguiev Tzatchkov •  
*Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*

## Resumen

El suministro intermitente, con frecuencia se presenta en países en vías de desarrollo. La inequitativa distribución del agua, la posible contaminación, las pérdidas, los costos adicionales que se generan para los consumidores y abastecedores del agua, el mal funcionamiento de las redes y la inconveniencia de los usuarios, son algunas de las consecuencias indeseables más comunes que provoca el suministro intermitente. Hay dos opiniones en el ámbito internacional de cómo puede ser considerado el problema. La primera considera que se debe a una mala administración del vital líquido, es decir, hay suficiente agua en las fuentes, pero no se suministra de manera continua a los usuarios, por lo que se requiere trabajar en ello para convertirlo en un suministro de 24 horas a través de la reducción de pérdidas de agua. La otra opinión acepta que el suministro intermitente es una realidad, que en muchas localidades, por muchos años, no se solucionará, por lo que busca trabajar sobre métodos apropiados de diseño y operación específicos para sistemas con operación intermitente, que puedan minimizar sus impactos negativos. Las diferencias más importantes entre la operación de las redes de distribución del agua con servicio intermitente y continuo se engloban en el segundo caso, tales como el llenado inicial y vaciado posterior de las redes, la demanda de agua dependiente de la presión, presión de diseño y otros. En este artículo se propone y ejemplifica el uso de modelos de redes que son conocidos y del dominio público, como el *SWMM*, para el llenado inicial y vaciado posterior de redes de agua, y el *EPANET*, para modelar redes con operación intermitente.

**Palabras clave:** suministro intermitente de agua, *EPANET*, *SWMM*, modelación de redes de distribución, llenados iniciales de redes, depósitos intradomiciliarios.

## Introducción

El suministro intermitente de agua potable (conocido en México como tandeado) puede ser definido como un suministro donde las tuberías de la red de distribución entregan agua a los usuarios por menos de 24 horas al día y los usuarios generalmente tienen depósitos de almacenamiento intradomiciliarios. Es un tipo de servicio que se encuentra muy poco en los países desarrollados, pero es muy común en muchos países en desarrollo (Totsuka *et al.*, 2004; Lee y Schwab, 2005). En algunos de ellos,

la prevalencia del suministro de agua es tan alta, que la mayoría de la gente lo considera como algo normal y no está motivada para hacer algo al respecto.

Los problemas más comunes que origina este tipo de suministro son los siguientes: la distribución inequitativa del agua entre los usuarios; la posible contaminación de la misma; las pérdidas y el desperdicio de agua; los costos a que hacen frente los usuarios y los abastecedores de agua; el funcionamiento incorrecto de las redes, que en muchas ocasiones provoca daños físicos a las tuberías; y la inconveniencia para

los consumidores (Totsuka *et al.*, 2004; Lee y Schwab, 2005). El agua que se recibe de la llave con frecuencia no es suficientemente pura para beber o no tiene buen sabor. Por estas razones, los usuarios tienen que comprar agua purificada costosa. Para superar las inconveniencias de no poder obtener el agua de la red de distribución en cualquier momento que la necesiten, los usuarios recurren a colocar un tanque de agua en la azotea de su casa, u otro depósito permanente, llamado en México "tinaco" (cuando está en el techo del edificio) o cisterna (cuando está en el nivel del piso). Este aditamento proporciona una reserva de agua que se utiliza en las horas sin suministro. Su necesidad varía considerablemente de una zona a otra y de una ciudad a otra. En la figura 1a y 1b se muestran los arreglos usados comúnmente en México con un depósito en la azotea. El primero de ellos, que se tiene en la figura 1a, consiste de un tanque más grande (cisterna) en el nivel del suelo y una bomba para llenar el tinaco, y se emplea cuando se necesita más agua para almacenar o cuando la presión del agua de la red de distribución en las horas de suministro es insuficiente para llenar un tinaco en el techo. El segundo, mostrado en la figura 1b, se usa cuando la presión del agua no es tan baja, de forma tal que el tinaco puede ser llenado directamente de la red. Frecuentemente en México estos arreglos se utilizan aun cuando el suministro es continuo, dado que los usuarios no confían que siempre se mantenga el servicio continuo, o también desconocen el funcionamiento, por lo que recurren a estas instalaciones, independientemente de si el servicio es continuo o no. Las normas de construcción locales en algunas ciudades mexicanas incluso ordenan tener un depósito de almacenamiento en sus domicilios.

En casos extremos, algunas casas de bajos ingresos, principalmente en las zonas rurales, tienen un tanque a cielo abierto de poca capacidad, situado en el nivel del suelo (ver figura 2), el cual no cuenta con una instalación hidráulica dentro de la casa. En algunos casos,

la línea del servicio que llena el tanque durante las horas de servicio permanece abierta sin poder cerrarse (no cuentan con llave o válvula de cierre tipo globo o válvula con flotador), ya que la cantidad de agua suministrada es tan poca que nunca es suficiente como para llenar completamente el tanque y si se llena, los usuarios permiten que se derrame el líquido.

Un estudio realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) durante el periodo de 2005-2006 definió indicadores específicos para caracterizar el desempeño de los organismos operadores de agua potable y alcantarillado del país (Bourguett *et al.*, 2006; Bourguett y Tzatchkov, 2007). Como parte de este estudio se revisó primero la conveniencia de utilizar para México los indicadores existentes del manual correspondiente de la International Water Association (IWA) (Alegre *et al.*, 2000), del Banco Mundial (Yepes y Dianderas, 1996) y del Banco de Desarrollo Asiático (McIntosh e Yñiguez, 1997). La mayoría de la gran lista de dichos indicadores resultó impráctica para las condiciones que prevalecen en México, principalmente por la gran cantidad de datos que se necesitan, muchos de los cuales son difíciles de obtener. Entonces, en vez de adoptar alguno de esos esquemas, se definieron indicadores específicos, uno de los cuales es el porcentaje de tomas domiciliarias con servicio de agua continuo. Se creó una página web de Internet de libre acceso (<http://www.pigoo.gob.mx/>) para transparentar la información de estos indicadores y tener acceso fácil para diferentes instituciones del país y público en general. El sitio web de Internet visualiza la evolución de los indicadores para los organismos operadores de agua que participan con proporcionar la información correspondiente, cubriendo todos los estados de México. En la figura 3 se muestra la evolución del indicador "Tomas domiciliarias con servicio continuo de agua potable de 24 horas al día", calculado como un promedio de los organismos operadores participantes en el país, expresado por la relación del número

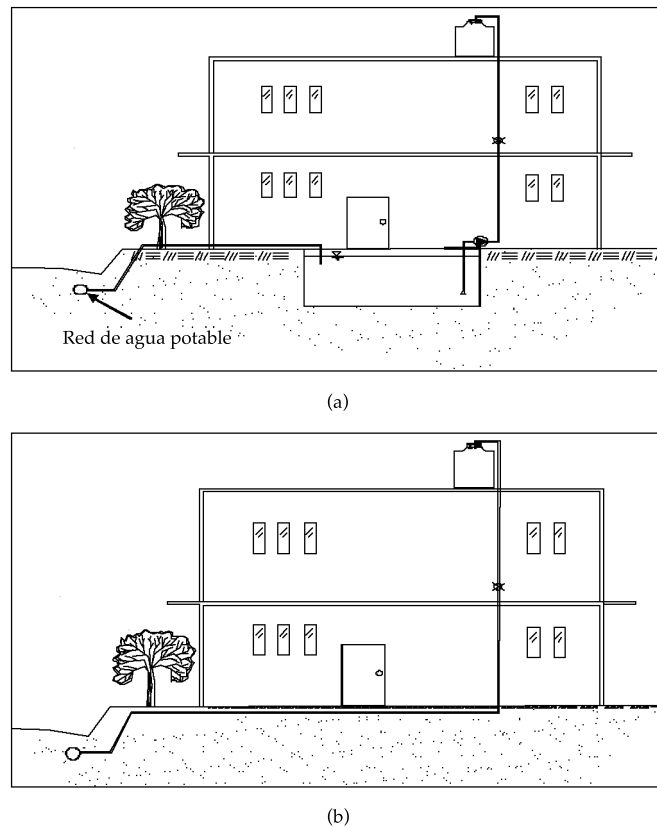


Figura 1. Arreglos de depósitos intradomiciliarios más usados en México: (a) cisterna en el nivel del suelo, bomba de agua y tinaco; (b) tinaco solo.

de tomas domiciliarias con servicio continuo y el número total de tomas en la ciudad. Este indicador muestra que una buena parte de las tomas de agua potable en México (entre 26 y 30%) no tiene un suministro continuo de agua 24 horas al día.

### Problemas relacionados con el suministro intermitente

El costo adicional para los usuarios y organismos operadores de agua, el desperdicio de agua, su posible contaminación y las molestias de los usuarios, son consecuencias bien conocidas del suministro intermitente de agua, documentadas en muchas referencias internacionales (Totsuka *et al.*, 2004; Lee y Schwab, 2005).

### Costos adicionales para los usuarios

Como resultado del suministro intermitente, los consumidores tienen que afrontar los costos para instalaciones adicionales, tales como depósitos de almacenamiento (tinacos y cisternas), bombas, suministro de agua alternativo e instalaciones domésticas de purificación del agua (como filtros). Algunas personas que no tienen esas instalaciones recurren a proveedores (pipas) para disponer de agua, lo que tiene un costo total mayor. Estos proveedores muchas veces cobran más que la tarifa de agua formal y pueden suministrar agua que a menudo es de dudosa calidad y no está disponible en cantidades adecuadas.

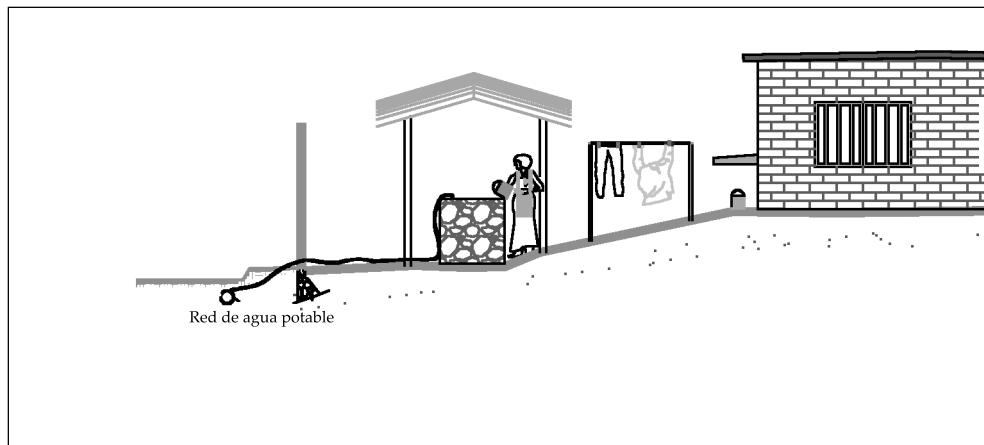


Figura 2. Depósito a nivel del piso usado en algunas casas de bajos ingresos en México. El servicio frecuentemente está abierto sin que pueda cerrarse.

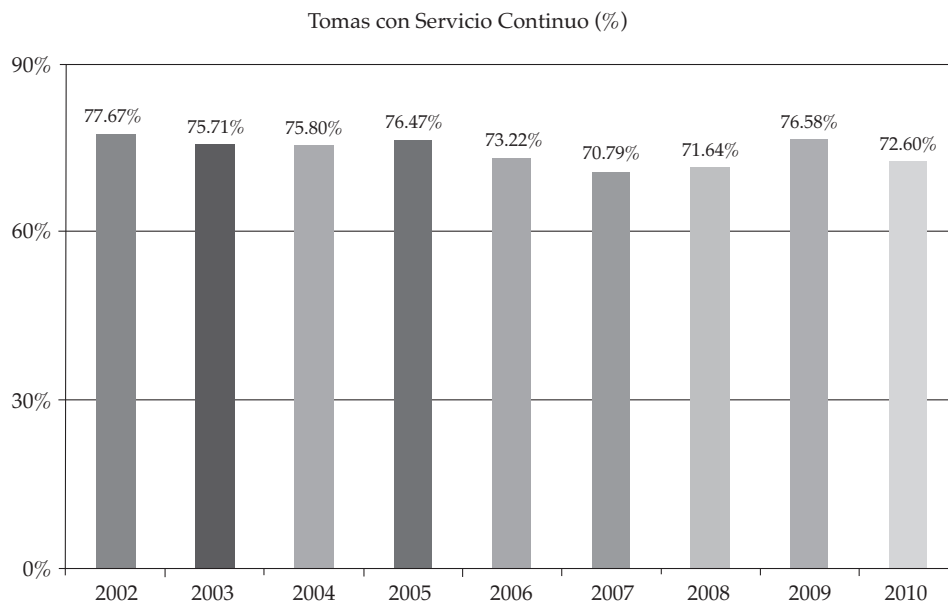


Figura 3. Evolución del indicador Tomas con Servicio Continuo de 24 horas al día del servicio de agua potable, promedio nacional (<http://www.pigoo.gob.mx/>).

### *Costos para los organismos operadores del agua*

Los organismos operadores también necesitan mano de obra adicional para operar el cierre y

la apertura de las válvulas de seccionamiento para distribuir el agua por tandeo en los distintos sectores de la ciudad. Regularmente se tiene un alto índice de tuberías que revientan (comparado con las redes con suministro

continuo), como resultado de los cambios de presión cuando se abren y cierran las válvulas para compartir el agua entre los usuarios. Las tuberías que se rompen incrementan el mantenimiento y las pérdidas de agua. Las tuberías y sus uniones tienen una vida útil menor, ya que son objeto de frecuentes suspensiones y reanudaciones del servicio. La manipulación constante de las válvulas aumenta la necesidad de un mayor mantenimiento y reemplazo de las válvulas. Algunos tipos de medidores no registran con precisión en condiciones de suministro intermitente y se generan dudas sobre la validez de la medición.

Los usuarios sin acceso de 24 horas diarias de suministro tienden a usar o desperdiciar más el agua que otros. Hay una propensión a almacenar más agua de la que se necesita. Algunos usuarios dejan abierta la llave de agua incluso después del periodo de suministro. Por otra parte, algunas válvulas de flotador que impiden el paso del agua una vez que las cisternas o tinacos estén llenos quedan fuera de control por estar averiadas, y al usuario no le interesa cambiarlas o repararlas. Esto puede provocar un desperdicio de agua una vez que se restablece el suministro.

En algunas ciudades mexicanas, la cobertura de micromedición es irregular y la medición de ésta no es muy eficaz o no hay micromedición. Por lo tanto, hay una razón adicional para utilizar tanta agua como la disponible para el consumo, sin que les cueste mucho a los consumidores. Debido al bajo costo de agua, los consumidores suelen utilizar el agua potable para el riego de sus jardines o para otros fines que no están especificados en la etapa de diseño. Por lo tanto, por un lado, los organismos operadores de agua están diseñando los sistemas basados en la demanda mínima para reducir los costos y, por otro lado, los usuarios que tienen un fácil acceso a más suministro la utilizan en exceso.

La detección y el manejo de las fugas se hacen más difíciles con suministro intermitente. Por último, frente a más costos y menos ingresos,

los organismos operadores de agua tienden a tener escasos fondos y por tanto no tienen recursos suficientes para proveer los servicios adecuados de operación y mantenimiento. Así, el índice de fugas es sumamente alto. Como consecuencia del pobre servicio, pobres ingresos y mantenimiento deficiente, el agua actual requerida para operar un sistema de suministro intermitente es típicamente más grande que la requerida para un sistema bien mantenido con suministro continuo.

### *Riesgos para la salud*

Cuando el suministro es intermitente, los usuarios tienen el riesgo de contraer enfermedades al usar agua no potable. Los depósitos intradomiciliarios (tinacos y cisternas) a menudo no son debidamente protegidos, ni limpiados y desinfectados de manera regular, lo cual crea un riesgo de contaminación. El suministro intermitente está sujeto a la intrusión de agua contaminada durante los periodos de baja presión y puede absorber aguas residuales durante los periodos de presión negativa (Creasey y Hunter, 2008). Otras fuentes de contaminación son la cisterna y el tinaco, a los cuales, si no se les da una adecuada protección y mantenimiento de limpieza periódico, puede entrar polvo y otra suciedad, o se pueden criar insectos (Jensen *et al.*, 2002). Además, los cambios repentinos de la presión generados por el suministro intermitente pueden causar esfuerzos adicionales en las tuberías y sus conexiones, haciéndolas más propensas a las fugas.

Dado que en México normalmente el agua de la llave no se utiliza directamente para beber, estos riesgos para la salud han sido de poca importancia en el país y no hay estudios disponibles relacionados con el tema. Se bebe agua embotellada (México es el segundo mayor consumidor de agua embotellada en el mundo). La única preocupación de los organismos operadores del agua es entregar agua clorada a los usuarios. El agua de la llave, no obstante, se utiliza frecuentemente para

cocinar, lavar ropa y trastes, y en el cepillado de los dientes, por tanto hay riesgos para la salud de los usuarios.

### *Ventajas percibidas en el suministro intermitente*

Algunos organismos operadores argumentan que el abastecimiento intermitente de agua es necesario en sus sistemas debido a lo siguiente:

- Se reducen las fugas de agua, ya que las tuberías pasan menos tiempo sometidas a condiciones de presión.
- El agua disponible se distribuye equitativamente, pues las horas de servicio son las mismas para cada usuario.
- Hay más tiempo para reparaciones y mantenimiento.

Sin embargo, esas ventajas son aparentes. Las fugas se detectan con mayor facilidad bajo condiciones de suministro continuo, por lo que se pueden adoptar medidas correctivas. El uso del agua en el suministro continuo es igual a la demanda, de tal manera que el agua se distribuye de acuerdo con dicha demanda.

En el servicio intermitente, los usuarios desperdician el agua, ya que aquellos que tienen depósitos intradomiciliarios más grandes y mayores presiones en sus tomas obtienen más agua que los demás, incluso más de la que necesitan, lo que lleva a mayor tiempo de residencia del agua antes de ser consumida.

### *Pérdidas aparentes de agua en sistemas con depósitos intradomiciliarios*

De acuerdo con los conceptos actuales (Lambert y Hirner, 2000), las pérdidas de agua en los sistemas de distribución de agua se clasifican en reales y aparentes. Las reales son las pérdidas físicas de agua, que van desde el sistema presurizado hasta el punto de medición de los usuarios; es decir, el

volumen perdido a través de todos los tipos de fugas, roturas y desbordamientos. Las pérdidas aparentes consisten en los consumos no autorizados (robo o uso ilegal), y todos los tipos de imprecisiones asociados con la medición de la producción y la medición de los consumos. Una submedición en la producción y una sobremedición de los consumos conlleva a una subestimación de las pérdidas reales. En cambio, una sobremedición de la producción y una submedición de los consumos conlleva a una sobreestimación de las pérdidas reales.

Las pérdidas aparentes son mayores en los sistemas con depósitos intradomiciliarios. En la figura 4 se muestra la suma de las pérdidas aparentes y el Consumo Autorizado No Facturado (Canofa) como porcentaje del consumo medido para varios países (Lambert, 2002). En color negro se muestra este dato para los sistemas con depósitos de almacenamiento sobre las azoteas, que presentan obviamente mucho mayores pérdidas de agua aparente, que las pérdidas aparentes en sistemas con presión directa de la red.

La causa principal para esas pérdidas aparentes es la submedición de consumos de los caudales bajos inducidos por la válvula de flotador del depósito. Rizzo y Cilla (2005), Rizzo *et al.* (2007), Charalambous *et al.* (2007) y Cobacho *et al.* (2007) estudiaron el problema y propusieron soluciones. Rizzo y Cilla (2005) reportaron que “el promedio de submedición de usuarios con uso doméstico, clase ‘D’ como resultado de los pequeños caudales inducidos por la válvula de flotador del depósito son alrededor del 6% del total de los consumos a los usuarios domésticos”.

### **Dos visiones para la solución de los problemas de la intermitencia**

En el ámbito internacional se han manejado dos formas de abordar los problemas del suministro intermitente de agua (Totsuka *et al.*, 2004). La primera definición ve al suministro intermitente como una falla en el servicio de

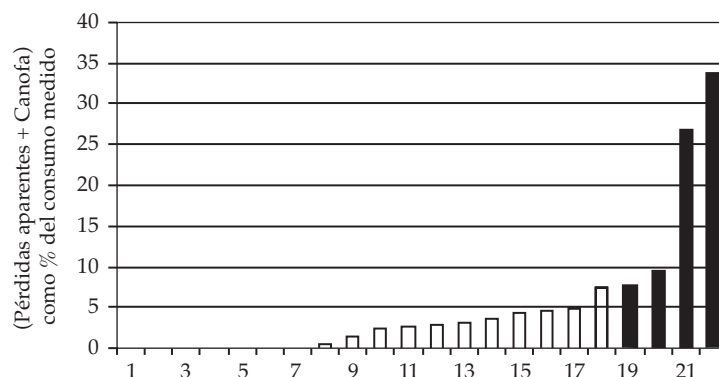


Figura 4. Pérdidas aparentes más Consumo Autorizado No Facturado (Canofa) como porcentaje de los consumos medidos. El color negro corresponde a sistemas con depósitos de almacenamiento en las azoteas.

agua, la cual debe ser abordada con todos los recursos disponibles hasta que se restauren las 24 horas de suministro. Se puede lograr mucho en este sentido mediante mejoras en la administración del vital líquido. De acuerdo con esta visión, el servicio intermitente se debe principalmente a altos niveles de agua no contabilizada, como una consecuencia de la ineficiente medición del agua entregada, estructuras tarifarias inadecuadas, deficiente facturación y cobro por el agua, pobre mantenimiento preventivo, falta de educación de los usuarios en la importancia de no desperdiciar el agua, etcétera; de esta manera, asumiendo que las fuentes de abastecimiento tienen cantidades de agua suficiente, no hay ninguna justificación para un servicio intermitente.

La otra definición ve al suministro intermitente como una realidad, ya sea por las cantidades escasas de agua en la fuente o por altos costos que se tendrían que pagar para llegar a un suministro continuo. Esta visión asume que la intermitencia permanecerá para un futuro previsible y por lo consiguiente aboga por la necesidad de proporcionar métodos apropiados de análisis, diseño y operación, y tecnologías que puedan minimizar los impactos negativos de la intermitencia en los usuarios.

Si bien cada una de estas dos visiones puede ser aceptada como válida, dependiendo de las condiciones locales de cada población, la segunda de ellas resulta más certera, sobre todo cuando se trata de modelación de la operación de sistemas existentes con servicio intermitente. Es un error común modelar un sistema de agua potable que opera con intermitencia con un modelo que asume un suministro continuo, algo que también se debe a que los modelos disponibles provienen de países desarrollados, donde el suministro es continuo. Los resultados de tal modelación distan mucho de la realidad.

Cabe aclarar también que estas dos visiones no atacan el mismo problema. En la primera de ellas se asume que existe una fuente de agua suficiente para el servicio continuo y que el servicio intermitente es una falla. Aun en este caso, el empleo de una modelación que considera el servicio intermitente es justificable, aceptando que la red opere de manera intermitente mientras se corrige la falla (algo que puede durar años), sin rechazar un método de modelación apegado a la realidad, con la finalidad de obtener un adecuado plan de operación.

En principio, el método de modelación de una red con operación intermitente por suministro insuficiente en la fuente también



puede manejarse de manera convencional con alguno de los criterios para la distribución de la demanda en la red, por ejemplo, por el criterio de demanda distribuida por longitud de tubo o por área de servicio. Conviene aclarar que en este caso, el caudal del agua que se distribuye en la red debe ser el que hay disponible, pues se parte del hecho de que el caudal de agua de la fuente es menor al que demanda la población. Pero para que tal modelación se corresponda con la realidad, se requiere que la distribución del agua sea completamente equitativa entre los usuarios o que cada usuario o área de servicio consuma exactamente la cantidad de agua asignada, algo que no sucede en el servicio intermitente, como ya se explicó.

Este artículo presenta las principales características que debe considerar la modelación de sistemas de agua potable con servicio intermitente, así como dos formas de realizar esta modelación con programas populares de análisis de redes, como lo son, por ejemplo, los programas *EPANET* y *SWMM*. Esto no significa que el objetivo de este artículo sea promover el servicio intermitente de agua potable. Todo lo contrario, los problemas de ese tipo de servicio (arriba descritos) lo definen claramente como desaconsejable. Si la tarea es diseñar un sistema de agua potable nuevo, o diseñar la rehabilitación de uno existente con recursos económicos y capacidad de las fuentes de agua suficientes, deben usarse los métodos tradicionales de modelación y ser diseñado para el servicio continuo. Pero si la tarea es modelar un sistema con servicio intermitente para mejorar, dentro de lo posible, su operación, entonces los métodos presentados en este trabajo son los más realistas, dado que toman en cuenta el funcionamiento de elementos que no se consideran en un modelo convencional, como son las fugas y tomas domiciliarias con tinacos y cisternas, en función de la presión que existe en la red. Estos métodos son también adecuados para modelar sistemas que ya tienen servicio continuo, pero que de todas formas tienen almacenamiento intradomiciliario. En México pueden encontrarse sistemas con esta

característica en dos situaciones: cuando el servicio fue intermitente en el pasado y la red se rehabilitó para servicio continuo, pero el almacenamiento intradomiciliario permanece, o cuando los usuarios, por desconfiar de la continuidad del servicio, lo construyen en sus casas, aunque no lo necesiten.

Por lo anterior es importante establecer que el método de modelación y de diseño intermitente que se propone en este artículo se recomienda únicamente en el caso de que haya fuentes de agua insuficientes, y como una medida temporal hasta que se consigan nuevas fuentes o se amplíen las fuentes existentes. Para el caso de las redes cuyas fuentes tengan suficiente caudal, el diseño de la red se debe hacer con un procedimiento de operación continuo; si las circunstancias obligan a una operación intermitente, se debe tomar como una falla en el servicio, y en este caso se debe aclarar que se aplicaría solamente el método de modelación que se ha propuesto y no el de diseño.

### **Modelación de una red de distribución de agua con servicio intermitente**

Desde su inicio, los modelos conocidos de cálculo de redes de distribución de agua fueron creados en países desarrollados donde el servicio del agua es continuo y la demanda de agua se satisface todo el tiempo. Cuando un usuario necesita agua, sólo basta con que abra la llave y reciba el líquido que necesita. Es por eso que tales modelos son normalmente "modelos dependientes de la demanda", es decir, que la demanda de agua es fija y el modelo obtiene las presiones en la red en función de la demanda dada. La mayoría de modelos de redes de distribución conocidos, tales como *EPANET* (Rossman, 2002), *Infoworks WS*, *ScadRed* (Tzatchkov e Izurieta, 1996) y otros son de ese tipo. Por el contrario, las redes de distribución de agua con servicio intermitente operan por un tiempo limitado, sólo cuando se proveen de agua. La cantidad de agua que el usuario puede captar depende de la presión

disponible en su conexión y la duración del servicio; y no siempre la demanda del usuario se satisface completamente, es decir, la operación de dichas redes es dependiente del suministro o “dependiente de la presión” y debe ser modelada de esta manera. El comportamiento hidráulico de un modelo dependiente del suministro o dependiente de la presión es muy diferente de un modelo dependiente de la demanda (Batish, 2003; Tzatchkov y Cabrera-Béjar, 2008).

Por otra parte, las redes de distribución con servicio continuo siempre están llenas de agua y las redes con servicio intermitente se llenan de agua cada vez que se reanuda el servicio. El llenado inicial y vaciado posterior de las redes obviamente no pueden ser modelados con los modelos conocidos dependientes de la demanda; por tanto, esos modelos especiales tienen que ser desarrollados. Tales modelos darían el tiempo que la red necesita para comenzar el servicio, el volumen de agua que se necesita para llenar la red, cuáles de los usuarios recibirán el servicio primero, etcétera.

Muchas redes de distribución de agua en países en desarrollo fueron diseñadas con principios basados en el suministro continuo, pero son operadas como sistemas intermitentes. En estos casos existe una gran disparidad entre la modelación y la operación real. Por lo tanto, la aplicación de los métodos convencionales de análisis de redes bajo condiciones de flujo intermitente es inadecuada y de ahí la necesidad modificar el diseño para los sistemas de distribución con suministro intermitente. Las siguientes consideraciones son importantes para la modelación y el diseño de redes con suministro intermitente (Batish, 2003; Tzatchkov y Cabrera-Béjar, 2008):

#### *Demanda de agua*

En el análisis convencional, los modelos dan como resultado el gasto en cada tubería de la red y la presión en cada nodo, basados en los datos proporcionados por el usuario. Los datos de entrada incluyen el nivel del

terreno, la demanda de agua en cada nodo y la conectividad, diámetro, longitud, rugosidad, etcétera, para cada línea. Una característica importante de dichos modelos es que la demanda se establece como un dato de entrada. En un sistema con operación intermitente, el suministro de agua para cada nodo depende de la presión disponible en dicho nodo. En realidad, depende del rendimiento colectivo de cada uno de los componentes del sistema. Por lo tanto, no hay relación directa entre la presión y la demanda en dicho nodo. El nuevo modelo dará como salida el suministro real disponible para los usuarios.

#### *Presión mínima requerida*

Las normas de diseño convencionales, basadas en operación continua de las redes, exigen cierta presión mínima en cada punto de demanda de la red. En México, la presión mínima de acuerdo con la normatividad de la Comisión Nacional del Agua (Conagua, 2007b) es de 15 metros de columna de agua (mca) en zonas urbanas y 10 mca en zonas rurales. El diseño de las redes en este caso, normalmente consiste en determinar los diámetros de las tuberías y las cargas de tanques y bombeos, de forma tal que se garantice esa presión mínima. En redes con servicio intermitente, la presión que se requiere es aquella que pueda llenar los depósitos intradomiciliarios, que a su vez depende de la altura de los edificios (esquema de la figura 1b con depósitos en los techos de las casas, o incluso casi igual a cero para el esquema de la figura 1a con cisternas al nivel del piso). De esta manera, el propio objetivo del diseño cambia en el caso de redes con operación intermitente.

#### *Variación horaria de la demanda*

Para describir la variación de la demanda durante el día, los modelos convencionales de redes de agua potable requieren de una curva de variación horaria de la demanda, que depende de las costumbres y actividades

de la población, y que normalmente expresa que la demanda de agua residencial es mayor durante ciertas horas del día y mínima en la madrugada. Tal curva de variación de la demanda no es aplicable en la modelación de una red con operación intermitente, donde la población recibe el agua en horarios preestablecidos.

#### *Coefficiente de variación de la demanda*

Llamado en algunos países también coeficiente pico o coeficiente punta, expresa, para una tubería dada, la relación entre el gasto máximo y el gasto medio que conduciría la tubería, y se utiliza ante todo para revisar su capacidad en el diseño. Aplicado a redes con operación intermitente, este concepto tendría otro significado. No es necesario considerar variaciones horarias de la demanda en operación intermitente. En el horario de servicio de cierta zona de la red, el gasto en la tubería que la abastece será aproximadamente uniforme. El coeficiente de variación, para fines de revisar si la capacidad de la tubería es suficiente, se define en este caso por la duración del servicio. Si el gasto medio, en litros por hora, se define como el volumen de agua suministrado en un día en litros entre 24 horas, y el mismo volumen se suministra en  $N$  horas, el coeficiente de variación  $CV$  es simplemente:

$$CV = \frac{N}{24} \quad (1)$$

Para un servicio de seis horas diarias, por ejemplo, se tendría un coeficiente de variación de 4, mucho más alto que aquel de un servicio continuo, que normalmente es del orden de 1.40-1.60 (Conagua, 2007a). Es decir, los gastos y las velocidades correspondientes en las tuberías que operan con servicio intermitente son mucho más altos que aquellos del servicio continuo.

#### *Sobrepresiones debido al aire expulsado*

Las tuberías del sistema de suministro intermitente no pueden permanecer llenas de agua durante las horas de suministro debido a las razones antes mencionadas. Esto puede crear espacios vacíos, que pueden ser ocupados por aire. A medida que el suministro de agua se restablezca éste deberá escapar por las salidas disponibles. La expulsión puede producir una sobrepresión debido a la rápida desaceleración del líquido en el instante en que el aire es totalmente expulsado. Durante el llenado de la red, la liberación del aire produce una reducción de la capacidad de conducción de las tuberías y en casos extremos puede causar "asfixia" si no se proporcionan los elementos necesarios para el desalojo del aire. Se necesita un análisis del flujo transitorio para modelar esas condiciones, de tal manera que se pueda obtener el número óptimo de válvulas de expulsión de aire para minimizar este efecto.

Para las localidades donde se suministra el agua a los depósitos de los usuarios, el efecto de la sobrepresión puede ser minimizado, debido a que el aire se desaloja a través de las entradas a los depósitos, que regularmente están abiertas durante el llenado de la red en periodos iniciales del suministro. Sin embargo, cuando se trata de líneas de alimentación con suministro intermitente que pueden sufrir dichas sobrepresiones, se recomienda realizar un análisis completo para obtener válvulas de aire de manera óptima.

#### *Fugas*

En los modelos de diseño, en el manejo de la demanda, las fugas usualmente se agregan a la demanda de los usuarios o se establece un multiplicador general para incrementar dicha demanda. Esto no considera el efecto de la presión sobre las fugas. Durante el periodo de alto consumo, las fugas tienden a ser bajas; de forma contraria, las fugas tienden a ser altas para el periodo de un consumo mínimo. Este aspecto no se contabiliza en el modelo tradicional.

En el ámbito internacional, Vairavamoorthy y colaboradores (Vairavamoorthy y Elango, 2000; Vairavamoorthy *et al.*, 2000) son quizás los únicos autores que han propuesto modelos para redes de distribución de agua considerando suministro intermitente. A pesar de que en algunos de sus artículos mencionan que dichos modelos estarían disponibles, la realidad es que actualmente no lo están. Además de eso, de la breve explicación en dichos artículos, sus modelos parecen ser más académicos que prácticos. La facilidad de uso y bajo costo (o no costo) de un modelo son fundamentales para ser usado en países en desarrollo, donde los recursos económicos generalmente son limitados. Afortunadamente existen modelos de computadoras de redes de agua y drenaje, libres, del dominio público, tales como el *SWMM* y el *EPANET*, que pueden ser usados para modelar las redes de distribución con suministro intermitente, como se propone en este artículo.

Un modelo del suministro intermitente de agua usando *EPANET* o un *software* similar tendría los siguientes componentes:

#### *Nodos de demanda*

Los nodos de demanda pueden ser representados por pequeños tanques o por demandas que sean dependientes de la presión.

#### *Substitución de los nodos de demanda por depósitos pequeños*

El tamaño del depósito dependerá del detalle de la información disponible para la red y del detalle requerido del modelo. Si la red con sus tomas domiciliarias está disponible en un Sistema de Información Geográfico (SIG), cada depósito en el modelo podría representar realmente un depósito intradomiciliario. En los casos en que las tomas domiciliarias no estén disponibles en un SIG, o si no se requiere un modelo tan detallado, se tendrá que generar un submodelo que represente un conjunto de tomas domiciliarias por medio de un nodo, el

cual debería estar localizado en el centro de gravedad del área de influencia de los usuarios que son asignados para el consumo. La relación de un depósito domiciliario y un nodo se asemeja a la demanda nodal en los modelos tradicionales de redes. Se tendrá que agregar también una tubería para representar la “toma domiciliaria”, la cual conecta el depósito con el nodo. Se debe tener especial cuidado para seleccionar los parámetros de la tubería. El flujo al depósito dependerá del diámetro, longitud y las propiedades de resistencia de esta tubería. La longitud puede ser tomada como igual a la altura del depósito sobre el nivel del suelo, por ejemplo, 10 metros.

Para modelar el llenado y vaciado de los depósitos intradomiciliarios, se debe simular la demanda de agua de las casas. Para ello se agrega una tubería que sale del depósito, y la demanda de agua se agrupa en un punto final. Cada depósito debe tener asignados niveles máximos y mínimos, de tal manera que el flujo hacia o desde él se convierta en cero cuando dichos niveles sean alcanzados.

#### *Nodos de demanda dependiente de la presión*

La substitución de los nodos de demanda por pequeños tanques permite modelos detallados, pero requiere muchos datos y puede ser difícil de aplicar en grandes redes. Cuando no hay información precisa acerca de los depósitos intradomiciliarios o la red a modelar es grande, se emplearía mucho tiempo para la simulación considerando un pequeño depósito en cada nodo de demanda. De una manera similar, en el modelo convencional en redes grandes, la red secundaria normalmente no se modela, concentrando su demanda en nodos de la red primaria. Lo mismo se puede hacer en el modelo propuesto, es decir, se podría utilizar un procedimiento más simple, donde la demanda en cada nodo representa la demanda de un grupo de casas (con sus depósitos intradomiciliarios), pero como una función de la carga de presión disponible en ese nodo, permitiendo que la demanda sea cero cuando

no hay presión suficiente. Cuando la carga de presión sea igual o inferior a un valor mínimo  $p_{\text{mín}}$ , la demanda de agua es cero. Cuando es igual o superior a un valor límite máximo  $p_{\text{máx}}$ , la demanda del usuario  $q_{\text{máx}}$  se satisface completamente; y cuando está entre los valores máximos y mínimos, la demanda de agua está relacionada con la presión con una función creciente. En términos matemáticos (Ingeduld *et al.* 2006):

$$q_i = 0, \text{ cuando } p_i \leq p_{\text{mín}} \quad (2)$$

$$q_i = q_i(p_i) = q_{i,\text{máx}} \sqrt{\frac{p_i - p_{\text{mín}}}{p_{\text{máx}} - p_{\text{mín}}}},$$

cuando  $p_{\text{mín}} > p_i > p_{\text{máx}}$  (3)

$$q_i = q_{i,\text{máx}}, \text{ cuando } p_i \geq p_{\text{máx}} \quad (4)$$

Se trata de un tipo de análisis hidráulico, donde la demanda de agua no es necesariamente igual a las demandas dadas por el usuario, sin embargo se comprueba la disponibilidad de agua sobre la base de las condiciones de presión en el nodo. Esto puede ser combinado con un modelo convencional, tal como el *EPANET*, siempre y cuando se implementen las ecuaciones (2) a (4).

### Fugas

Las fugas son también dependientes de la presión. Sobre todo si el agua se suministra de forma intermitente, en tiempos donde el sistema está vacío, no habrá fugas en absoluto. En los modelos hidráulicos tradicionales, las fugas normalmente se distribuyen por igual a la demanda, en general, utilizando un factor de incremento para todas las demandas (suponiendo que hay una gran cantidad de fugas donde se encuentra una gran cantidad de consumos). Sin embargo, este supuesto no puede ser cierto para todas las redes de agua potable, ya que la descarga de una fuga

depende de la presión disponible, similar a la descarga de un orificio. Las ecuaciones (5) y (6) describen la descarga a través de un orificio:

$$q_{\text{leakage}} = 0, \text{ cuando } p_i - p_o \leq 0 \quad (5)$$

$$q_{\text{leakage}} = q_{\text{leakage}}(p_i) = K(p_i - p_o)^\beta,$$

cuando  $p_i - p_o > 0$  (6)

Donde  $p_i$  es la presión aguas arriba del orificio;  $p_o$  la presión aguas abajo del orificio ( $p_o = 0$  cuando las fugas descargan a la atmósfera), y  $K$  representa el coeficiente de orificio, que depende del tipo de orificio. El valor del exponente  $\beta$  es de 0.5 de acuerdo con la teoría de los orificios de área de descarga constante, razón por la cual muchos ingenieros asumen incorrectamente que el gasto de las fugas en los sistemas de distribución debe variar con la raíz cuadrada de la presión, y de esta manera será casi insensible a los cambios de presión. El valor real de  $\beta$  es diferente debido a un posible cambio de área del orificio debido a la acción de la presión de la red y otros factores. En muchas referencias internacionales se acepta que  $\beta = 1.18$ . Lambert (2000) estudió con más detalle la relación entre la presión y las fugas de agua en las redes de distribución.

### Calibración del modelo

El modelo necesita ser calibrado en cualquiera de las variantes propuestas. En la variante con sustitución de los nodos de demanda por depósitos pequeños, en cada toma equivalente con tinaco y cisterna deberá definirse con la calibración la longitud, el diámetro y la rugosidad del conducto de la toma, así como el volumen del tinaco o cisterna. En la variante con nodos de demanda dependiente de la presión deberán definirse los parámetros en las ecuaciones (2) a (4), y de igual manera los parámetros de las fugas en las ecuaciones (5) a (6). El modelo de calibración puede ser cualquier procedimiento que convenga, incluyendo

un procedimiento inverso que resuelve la ecuación de continuidad en los nodos, con lo cual se limita la cantidad máxima de variables que pueden obtenerse. No obstante, la exposición de tal procedimiento está fuera del alcance del presente artículo.

### Llenado inicial y vaciado posterior de las tuberías de la red

Las tuberías de las redes con operación intermitente se vacían completa o parcialmente según la topografía del lugar, cada vez después de interrumpirse el servicio, y se llenan nuevamente con agua en el siguiente turno de servicio. El proceso de llenado y vaciado puede ser modelado, pero con métodos diferentes. Modelos de este tipo darían el tiempo en que iniciaría el servicio para los diferentes usuarios en la red, y el retraso con que recibirían el servicio los usuarios más alejados de la fuente, así como los posibles procesos de atrapamiento del aire en el llenado. Durante el llenado en las tuberías se tiene inicialmente un flujo no permanente a superficie libre, que se describe por el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales de Saint Venant:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + v \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} = g(s_0 - s_f) \quad (8)$$

las cuales representan las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento en una dimensión, respectivamente, donde  $c$  es la celeridad de la onda de gravedad y se calcula como:

$$c = \sqrt{g \frac{A}{T}} \quad (9)$$

$y$  es el tirante;  $v$ , la velocidad media del flujo;  $g$ , la aceleración de la gravedad;  $A$ , la sección

transversal del tubería;  $T$ , el ancho superior del flujo;  $s_f$ , el gradiente de energía;  $s_0$ , la pendiente de la tubería;  $t$ , el tiempo, y  $x$  es la distancia medida a lo largo de la tubería.

Conforme se van llenando las tuberías, el flujo no permanente a superficie libre se convierte primero en flujo no permanente a presión (que se describe por las ecuaciones (10) y (11) siguientes), y finalmente a flujo permanente a presión:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + v \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} = g(s_0 - s_f) \quad (11)$$

donde  $a$  es la celeridad de la onda de presión y  $y$  es la carga piezométrica.

Durante el vaciado se tiene el proceso inverso: el flujo a presión se convierte en flujo de superficie libre.

Las ecuaciones (7), (8), (10) y (11) se sujetan a las siguientes condiciones de frontera:

- El ingreso de agua del nodo fuente  $f$  a la red:

$$q_f = q_f(t) \quad (12)$$

- La continuidad de los gastos en los nodos de la red:

$$\sum_{j=1}^{n_i} Q_j = q_i \quad (13)$$

- Y el llenado o vaciado de los depósitos:

$$q_i = -\frac{dV_i}{dt} \quad (14)$$

$$q_i = 0 \quad (15)$$

cuando el depósito se llena o vacía completamente.

donde  $q_f$  es el gasto de entrada de la fuente a la red;  $Q_r$  los gastos que fluyen en las tuberías de la red;  $q_r$  los gastos que egresan (demanda) o ingresan de cada nodo  $i$  de la red;  $n_r$  la cantidad de tuberías que entran o salen del nodo  $i$ ;  $V_r$  el volumen de agua dentro del depósito en el nodo  $i$ , y  $t$  es el tiempo.

Los dos sistemas de ecuaciones diferenciales (ecuaciones (7), (8), (11) y (12)) se deben solucionar por métodos numéricos que tengan la capacidad de considerar las transiciones de flujo a superficie libre a flujo a presión, y viceversa. Afortunadamente, el programa *SWMM*, que se describe más abajo, incluye estas facilidades. Aunque es un programa para el manejo de aguas pluviales, presenta analogías con el llenado y vaciado de una red de agua potable; en particular, el hidrograma de gastos pluviales que entran en un sistema de redes de drenaje pluvial es semejante a utilizar una curva de variación del suministro ubicada en la fuente. Los nodos que utiliza *SWMM* son pozos de visita, que están abiertos y conectados con la superficie; para simular el llenado y vaciado de redes de agua potable se sustituyen esos nodos con pozos ficticios de una altura muy grande para que no se derrame el agua y no haya “inundaciones”, así trabajan como si fueran piezómetros. Los nodos de depósitos para la regulación de los gastos pluviales que utiliza *SWMM* se cambian por depósitos intradomiciliarios, que son parte de las redes de agua potable.

*SWMM* resuelve las ecuaciones del flujo no permanente unidimensional utilizando un esquema numérico de diferencias finitas de tipo explícito. En cada elemento de conducto se obtiene el caudal  $Q$  en cada instante de tiempo, aplicando las ecuaciones de Saint Venant (ecuaciones (7), (8), (10) y (11)), que toman la siguiente forma:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAs_f + gAh_L \quad (17)$$

donde  $H$  es la carga piezométrica en el conducto y  $h_L$  son las pérdidas unitarias locales.

*SWMM* considera la condición de entrada en carga a través de los nodos: un nodo está presurizado cuando el nivel del agua en este nodo supera el nivel de la clave del conducto más alto conectado a él. En esta situación, *SWMM* determina los flujos y niveles del agua en los nodos presurizados a través de una ecuación de perturbación de caudal (ecuación (18)), de tal forma de que se cumpla con la ecuación de continuidad en los nodos que están entrando en carga:

$$\Delta H = \frac{-\sum Q}{\sum \partial Q / \partial H} \quad (18)$$

El Modelo de Manejo de Aguas Pluviales (*SWMM*, por sus siglas en inglés) (Rossman, 2008) es un modelo de simulación para cuantificar el escurrimiento y la calidad que transporta este escurrimiento a través de un sistema de tuberías, canales, dispositivos de depósitos/tratamiento, bombas y reguladores. Dicho modelo fue realizado por la Agencia de Protección al Medio Ambiente de los Estados Unidos de Norteamérica y puede ser descargado libremente del sitio de Internet: <http://www.epa.gov/ednrmrl/models/swmm/index.htm>. Siendo capaz de modelar la transición de flujos a superficie libre a flujos presurizados en la red de tuberías, *SWMM* podría ser usado para modelar el llenado inicial y el vaciado posterior de una red de distribución de agua potable. Los siguientes procesos pueden ser usados para dicha modelación (explicados en términos de *SWMM*):

1. No se introducen las áreas de las subcuencas.
2. La fuente o el tanque de agua son representados por un depósito con las dimensiones reales del tanque y se introduce un patrón de entradas correspondiente al programa de suministro dado.

3. Se asigna un valor grande (por ejemplo, 100 m) a la profundidad de sobrecarga (*Surcharge depth*, en inglés) en cada nodo de la red. De esta manera se evita la superficie de inundación en el nodo y por lo tanto se pueden modelar las tuberías con flujo a presión.
4. Cada depósito o tinaco (o grupo de tinacos) se representa como un almacenamiento con sus respectivas dimensiones.
5. La demanda del agua, tomada de los tinacos, es representada como una curva de aportación con valores negativos aplicados a cada almacenamiento.
6. En las opciones de simulación del SWMM se activa el método de la "Onda Dinámica".
7. Bajo la modalidad de onda dinámica del SWMM se requiere tener al menos un nodo de descarga en la red. Puesto que no hay tales nodos en una red de distribución de agua, se agrega un nodo ficticio en alguna parte y se conecta con una tubería ficticia al nodo real más cercano de dicha red. Los diámetros de esta tubería ficticia se asignan con valores pequeños, por ejemplo de 0.001 m, de modo que no influye en los resultados de la simulación.
8. En SWMM se obtiene la evolución del flujo en las tuberías, la evolución de llenado y vaciado de los tinacos, y así sucesivamente.

La figura 5 muestra una red de distribución pequeña localizada en la ciudad de Guadalajara, México, modelada en SWMM por un periodo de tres días con el suministro intermitente del agua, con cinco horas de suministro diario. El itinerario de suministro correspondiente aplicado a la fuente de agua se muestra en la figura 6. El modelo abarca tres ciclos del llenado de la red, cinco horas de servicio del agua en cada ciclo y vaciados de la red. El área de servicio comprende 462 predios y 2 310 habitantes, que corresponden a un gasto máximo horario de diseño de 17.40 l/s de acuerdo con las normas de diseño de México. La longitud total de las tuberías en la red es de 4 090 m, con diámetros que varían de

50 a 150 milímetros. La fuente de suministro es un tanque. En la figura 7 se muestra el perfil instantáneo de la superficie del agua durante el llenado de la red, obtenido por SWMM para una serie de tres tuberías de 100 milímetros de diámetro de esta red. La figura 8 muestra la evolución del nivel del agua en uno de los tinacos (el más cercano a la fuente de suministro) obtenida por SWMM para el periodo de tres días. El aumento del nivel del agua corresponde a horas con servicio de agua, y su disminución se da por la demanda de agua durante las horas de no servicio.

Una aproximación ligeramente diferente sería modelar con SWMM sólo el llenado inicial de la red, y después que en el modelo se haya llenado dicha red, continuar la modelación de la operación con EPANET, según lo explicado en la próxima sección, para hacer uso de más opciones de modelación incluidas en EPANET, que son específicas para redes de distribución de agua. Para modelar el vaciado de la red, una vez concluido el ciclo de suministro se utiliza nuevamente SWMM.

En su forma original, el programa de cómputo SWMM no considera la posibilidad de que haya aire a presión cuando la tubería se está llenando, por lo que no podría utilizarse para la selección de las válvulas de admisión y expulsión de aire que se puedan necesitar, siendo éste un tema para un trabajo futuro.

### **Modelación de redes de distribución de agua con tinacos en EPANET**

Desarrollado también por la Agencia de Protección al Medio Ambiente de los Estados Unidos de Norteamérica, EPANET es un *software* que modela sistemas de tuberías de distribución de agua potable. Puede ser descargado libremente del siguiente sitio de Internet: <http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/dw/epanet.html>. A pesar de que se basa principalmente en un modelo dependiente de la demanda, tiene un componente llamado emisor (*emitter*, en inglés), que puede ser usado para modelar el suministro intermitente, que



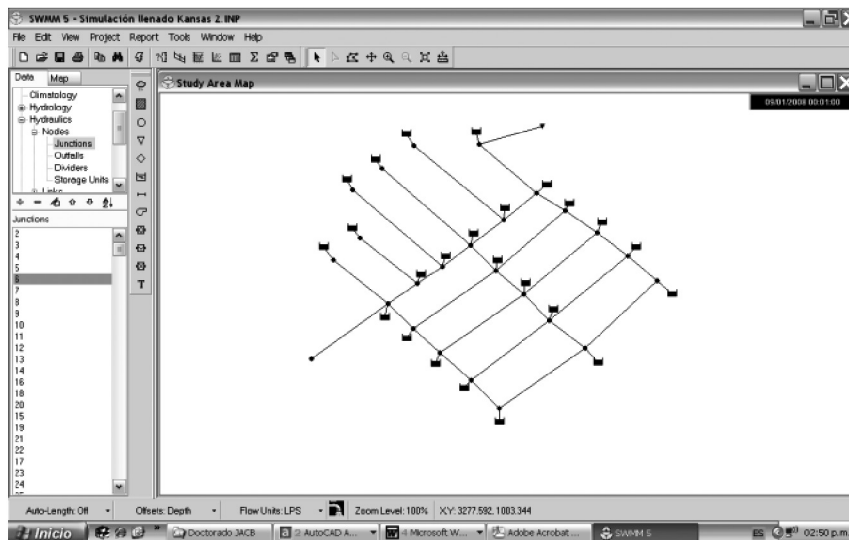


Figura 5. Red de distribución de agua modelada para el llenado inicial en SWMM.

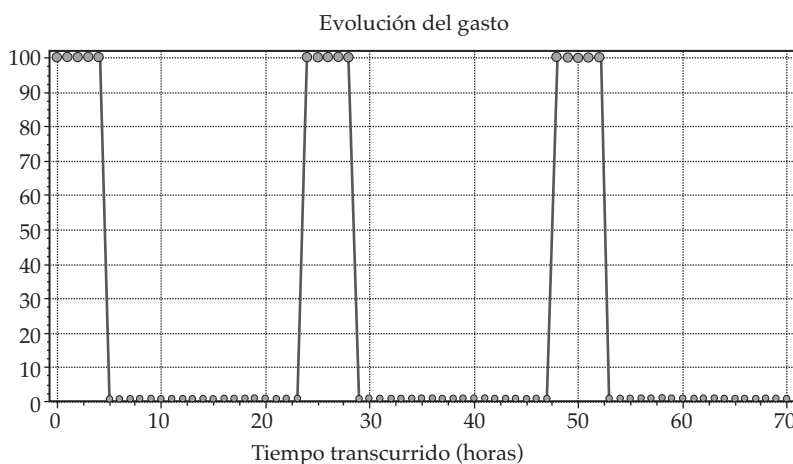


Figura 6. Evolución del abastecimiento de agua aplicado en el tanque fuente de la red mostrada en la figura 5.

en términos matemáticos se describe por una ecuación similar a la ecuaciones (3) y (6). La modelación después de un llenado inicial se puede hacer de dos maneras:

1. En principio, cada tinaco podría ser modelado en *EPANET* como un depósito

conectado con la red. Dado el número extremadamente grande de tomas domiciliarias conectadas a la red de distribución de agua, esta forma obviamente es impráctica; sin embargo, podría usarse con depósitos equivalentes, cada uno de los cuales representa un grupo de tinacos;

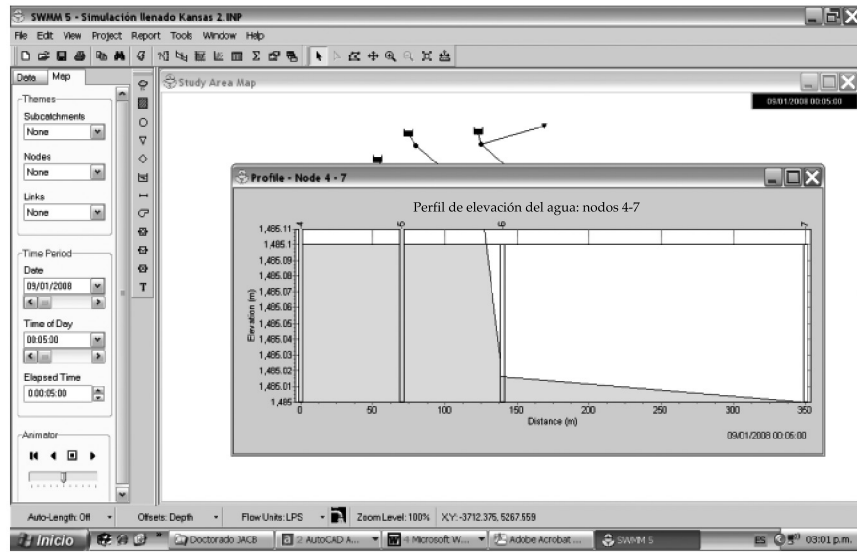


Figura 7. Perfil instantáneo de la superficie del agua durante el llenado de la red, obtenido por SWMM para una serie de tres tuberías de 100 milímetros de diámetro.

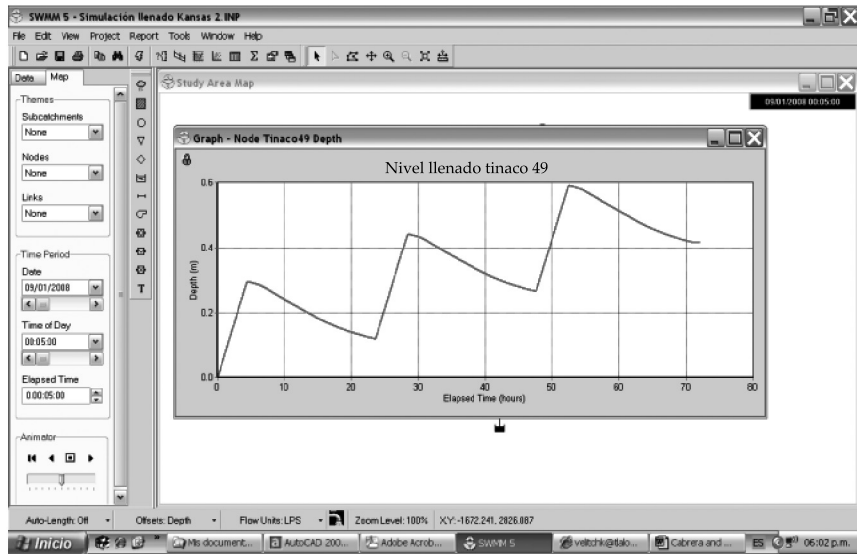


Figura 8. Evolución del nivel del agua en uno de los tinacos de la red mostrada en la figura 5, modelado por SWMM.

de la misma manera, la demanda de agua para un grupo de tomas domiciliarias es concentrada en los nodos de la red, así como se hace en los modelos convencionales de

redes de distribución de agua. En la figura 9 se muestra la red de la figura 5 modelada en EPANET con esta suposición. En la figura 10 se muestra un acercamiento a uno

de los tanques equivalentes. La tubería que sale del tanque es usada para representar el uso del agua dentro de las casas.

- La representación de cada nodo de demanda como un emisor. Esta suposición más simple puede ser más apropiada para redes grandes.

### Conclusiones

El servicio intermitente de agua es indeseable, sin embargo se presenta en varios países en vías de desarrollo. Un cambio a 24 horas de servicio continuo es posible mediante la reducción de las fugas y el agua no cobrada, y otros medios técnicos, con tal de que haya recursos económicos y suficiente agua en las fuentes; empero, puede tomar muchos años lograrlo. Mientras tanto, podrían usarse los modelos específicos de servicio intermitente de agua para un mejor entendimiento del comportamiento hidráulico de las redes de distribución de agua con suministro intermitente, y para mejorar su diseño y

operación. Los modelos conocidos de redes de distribución de agua fueron creados para modelar redes con suministro continuo, por lo que no son apropiados para las redes con suministro intermitente, que son dependientes de la presión y del suministro. La modelación de las redes con suministro intermitente es más compleja, comparada con la de las redes con suministro continuo, debido al llenado y vaciado de las tuberías en cada ciclo de suministro en que sucede un cambio de flujo a superficie libre a flujo presurizado y viceversa, así como a que el consumo de agua potable no es fijo, sino que depende de la presión disponible en cada toma y de la cantidad de agua suministrada. Existe *software* gratuito, como *SWMM* y *EPANET*, que puede ser usado, con algunas adecuaciones, para modelar el servicio intermitente, considerando la presencia de tinacos y cisternas. En el presente artículo se proponen las adecuaciones que hay que hacer para lograr tal modelación. *SWMM* puede ser usado para modelar el llenado inicial y el vaciado posterior de las redes; y *EPANET*, para modelar la operación.

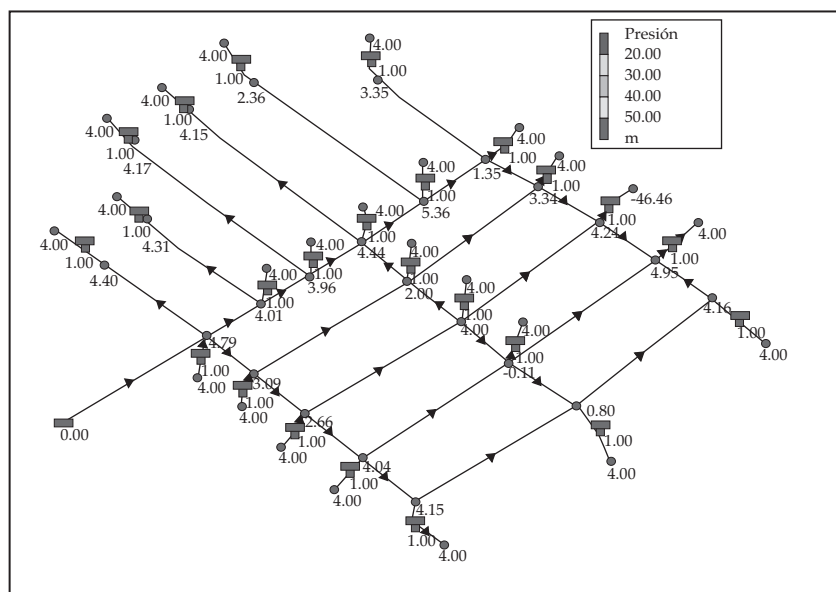


Figura 9. Red con tinacos modelada en *EPANET*.

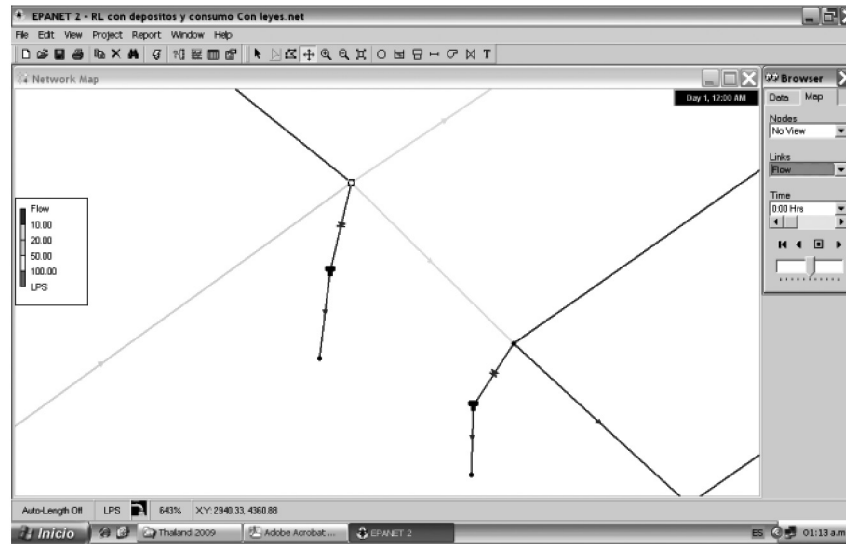


Figura 10. Red de distribución con depósitos modelados en EPANET. Un acercamiento a un tinaco.

de la red una vez presurizada. Se requiere trabajo futuro para incluir en la modelación la posible compresión del aire a presión cuando las tuberías se están llenando, con la finalidad de que este mismo programa pudiera utilizarse para la selección de las válvulas de admisión y expulsión de aire, y para definir un procedimiento de calibración del modelo.

Recibido: 27/09/10  
Aceptado: 12/01/12

## Referencias

- ALEGRE, H., HIRNER, W., BAPTISTA, J., and PARENA, R. *Manual of Best Practice. Performance Indicators for Water Supply Services*. London: IWA Publishing, 2000.
- BATISH, R. *A New Approach to the Design of Intermittent Water Supply Networks*. Proc. ASCE EWRI World Water and Environmental Congress in Filadelfia, USA, ASCE, Reston, Va., 2003, pp. 1-11.
- BOURGUETT, V.J. and TZATCHKOV, V. *Water utility performance indicators of Mexican cities*. Proc. 4th IWA Specialist Conference on Efficient Use and Management of Urban Water Supply, Jeju, Korea, 2007, pp. 1-8.
- BOURGUETT, V.J., HANSEN, P., TZATCHKOV, V. y CALDIÑO, I. *Seguimiento del desempeño de calidad del servicio de organismos operadores de agua potable en el país*. Informe final. Proyecto indicadores. Subcoordinación de Hidráulica Urbana, Coordinación de Tecnología Hidráulica, IMTA, 2006.
- CHARALAMBOUS, B., CHARALAMBOUS, S., and IOANNOU, I. *Meter Under-Registration Caused by Ball Valves in Roof Tanks*. International Water Association Conference Water Loss, 2007, Bucarest, Romania, 2007, <http://waterloss2007.com/>, pp. 710-719.
- CONAGUA. *Datos básicos*. Manuales de Diseño de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, diciembre de 2007a, 87 pp.
- CONAGUA. *Redes de Distribución*. Manuales de Diseño de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, diciembre 2007b, 248 pp.
- COBACHO, R., ARREGUI, F., CABRERA, E., and CABRERA, E.J.R. *Private Water Storage Tanks: Evaluating Their Inefficiencies*. *Conference Proceedings. Efficient 2007: The 4th IWA Specialised Conference on Efficient Use of Urban Water Supply*, Jeju Island, Korea, 2007, p. 951.
- CREASEY, J. and HUNTER, P.A. *Review of Research on Pressure Fluctuations on Drinking Water Distribution Systems and Consideration and Identification of Potential Risks of Such Events Occurring in UK Distribution Systems*. Report No.: DEFRA7555.01. Norwich, UK: University of East Anglia, 2008.

- JENSEN, P.K., ENSINK, J.H., JAYASINGHE, G., VAN DER, H.W., CAIRNCROSS, S., and DALSGAARD, A. Domestic transmission routes of pathogens: the problem of in-house contamination of drinking water during storage in developing countries. *Trop. Med. Int. Health*. Vol. 7, No. 7, 2002, pp. 604-609.
- LAMBERT, A. International Report: Water losses management and techniques. *Water Science and Technology: Water Supply*. Vol. 2, No. 4, 2002, pp. 1-20.
- LAMBERT, A. *What do we know about Pressure: Leakage Relationships in Distribution Systems?* IWA Conference on System Approach to Leakage Control and Water Distribution Systems Management, Brno, 2000.
- LAMBERT, A. and HIRNER, W. *Losses from Water Supply Systems*. Standard Terminology and Recommended Performance Measures. London: International Water Association, 2000.
- LEE, E.J. and SCHWAB, K.J. Deficiencies in drinking water distribution systems in developing countries. *Journal of Water and Health*. Vol. 3, No. 2, 2005, pp. 109-127.
- McINTOSH, A.C. and YÑIGUEZ, C. *Second Water Utilities Data Book: Asian and Pacific Region*. Manila: Asian Development Bank, 1997.
- RIZZO, A., BONELLO, M., and ST. JOHN, S.G. *Trials to Quantify and Reduce in-situ Meter Under-Registration*. International Water Association Conference Water Loss, 2007, Bucarest, Romania, 2007, <http://waterloss2007.com/>, pp. 695-703.
- RIZZO, A. and CILLA, J. Quantifying Meter Under-Registration caused by the Ball Valves of Roof Tanks (for direct plumbing systems). *Conference Proceedings*. IWA Specialized Conference Leakage, 2005, Halifax, Nova Scotia, Canada, p. 106.
- ROSSMAN, L. *EPANET, Users Manual*. Cincinnati: Water Supply and Water Resources Division, United States Environmental Protection Agency, 2002.
- ROSSMAN, L.A. *SWMM Storm Water Management Model, User's Manual, Version 5.0* [en línea]. Cincinnati: Water Supply and Water Resources Division National Risk Management Research Laboratory. Disponible en *World Wide Web*: <http://www.epa.gov/ednrmrl/models/swmm/index.htm>, 2008.
- TOTSUKA, N., TRIFUNOVIC, N., and VAIRAVAMOORTHY, K. *Intermittent urban water supply under water starving situations*. Proc. 30th WEDC International Conference, Vientiane, Lao PDR, People-Centred Approaches to Water and Environmental Sanitation 30TH wedc International Conference, Vientiane, Lao PDR, 2004.
- TZATCHKOV, V. y CABRERA-BÉJAR, J.A. Una forma de modelar el suministro intermitente de una red de distribución de agua potable. *Memorias*. VIII Seminario Ibero-americano SEREA (en español), Lisboa, Portugal, 2008.
- TZATCHKOV, V. e IZURIETA, D.J. Sistema de cómputo para el análisis y diseño óptimo de redes de distribución de agua potable. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XI, núm. 2, mayo-agosto de 1996, pp. 55-63.
- VAIRAVAMOORTHY, K. and ELANGO, K. Guidelines for the design and control of intermittent water distribution systems. *International J. Appropriate Technologies for Water Supply and Sanitation-Waterlines, ITDG*. Vol. 21, No. 1, 2002, pp. 19-21.
- VAIRAVAMOORTHY, K., ALI, M., and LIN, Z. An Appropriate Design Tool for Intermittent Water Supply Systems. *Proceedings of the International Conference on Intermittent Drinking Water Supply System Management*. Mumbai, 2000.
- YEPES, G. and DIANDERAS, A. *Water and Wastewater Utilities: Indicators*. 2<sup>nd</sup>. edition. Washington, D.C.: Water and Sanitation Division, The World Bank, 1996.

## Abstract

CABRERA-BÉJAR, J.A. & TZATCHKOV, V.G. *Modeling water distribution networks with intermittent water supply*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. III, No. 2, April-June, 2012, pp. 5-25.

*Intermittent water supply is prevalent among developing countries. Some of its consequences are inequitable water distribution, possible water contamination, wasting water, duplicated costs for consumers and water providers, meter malfunctioning and inconvenience to consumers. There are two major views on how this problem should be addressed. The first considers the problem to be derived from bad administration and management, i.e., there is enough water at the water supply sources but it is not provided continuously to the users, and so a transfer to 24-hour supply by reducing water loss is the only solution. The second view accepts intermittent supply as a reality that will continue for many years in many places and looks for appropriate design and operation methods specific to intermittent water supply that can minimize its negative impacts. Important differences between intermittent and continuous service by water distribution networks are covered by the second case, such as initial network charging and emptying, pressure-dependent water demand, and design pressure. This paper proposes and describes the use of known, free, public domain network models, such as SWMM for modeling initial pipe network charging and emptying, and EPANET for modeling networks with intermittent operations.*

**Keywords:** *intermittent water supply, EPANET, SWMM, distribution network modeling, initial network charging, household water storages tanks.*

## Dirección institucional de los autores

*M.I. José Antonio Cabrera-Béjar*

Universidad Nacional Autónoma de México  
Secretaría de Posgrado e Investigación  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Hidráulica, edificio B, primer piso  
Circuito Escolar Exterior, Ciudad Universitaria, Coyoacán  
04510 México, D.F., MÉXICO  
Teléfono: +52 (55) 5622 3279

Ingeniería Integral del Agua, Ferca, S.A de C.V.  
General San Martín 208, int. 103, colonia Americana  
44160 Guadalajara, Jalisco, MÉXICO  
Teléfono: +52 (33) 3616 6801  
antoncabejar@yahoo.com.mx

*Dr. Velitchko Gueorguiev Tzatchkov*

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  
Coordinación de Hidráulica  
Subcoordinación de Hidráulica Urbana  
Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso  
62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO  
Teléfono: +52 (777) 3293 600, extensión 898  
Fax: +52 (777) 3293 678  
velitchk@tlaloc.imta.mx