

XIX SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA

REGLAS DE OPERACIÓN PARA EVITAR EL DESPRENDIMIENTO DE BIOPELÍCULAS Y PELÍCULAS MINERALES EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

M. A. Escovar¹, J. G. Saldarriaga²

¹Investigador, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados –CIACUA–, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia; email: ma-escov@uniandes.edu.co

²Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental - Director, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados –CIACUA–, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia; email: jsaldarr@uniandes.edu.co.

RESUMEN

El desprendimiento del material adherido a las tuberías de los sistemas de distribución de agua potable favorece los eventos de coloración, lo cual ocasiona en primer lugar el rechazo de parte de los consumidores y también es un riesgo potencial para la salud pública asociado con enfermedades causadas por patógenos presentes en el agua. Estos inconvenientes se pueden prevenir realizando una adecuada operación de la red al evitar cambios considerables en la velocidad del flujo y el esfuerzo cortante dentro de las tuberías, así como prevenir el cambio de dirección de flujo. Este trabajo consiste en proponer reglas de operación para evitar el desprendimiento de material adherido a la pared de la tubería, basado en la modelación hidráulica de diferentes redes de distribución de agua potable. Se encontró que para lograr un mínimo desprendimiento de películas se debe hacer un control efectivo del cambio en magnitud y dirección del flujo que recorre cada tubería; posible mediante la operación de las válvulas de la red.

ABSTRACT

The detachment of the particles stick to the pipe's walls in water distribution systems is the main reason for the discoloration events, which mainly causes the reject of water quality by the consumers, and on the other hand, is a potential risk for public health due to pathogens related diseases. These problems can be avoided by performing a proper operation of the water distribution system, to prevent significant changes in the water velocity and sheer stress, as well as prevent backflow. Operation rules are proposed in this article to prevent detachment in water distribution systems, based on the hydraulic modeling of different networks. It was found that to achieve a minimum amount of particles detached, an effective control in the change of flow's magnitude and direction must be done; possible through the operation of the valves of the network.

PALABRAS CLAVES

Redes de distribución de agua potable, biopelículas, desprendimiento, algoritmos genéticos.

INTRODUCCIÓN

El deterioro de la calidad del agua dentro de una red de distribución se debe principalmente a la presencia de partículas y microorganismos que entran al sistema y se adhieren y acumulan en las paredes de las tuberías. Cuando se generan cambios considerables en la operación hidráulica de la red, principalmente cambios en la velocidad del flujo, se produce el desprendimiento de estas películas que luego se movilizan con el agua y llegan al consumidor. Usualmente, las quejas y reclamos de los consumidores advierten a la empresa sobre el deterioro de la calidad del agua que sufre dentro de la red, por lo que solo se pueden aplicar medidas correctivas y generalmente los perjuicios al cliente ya se han causado. La dificultad de medir la calidad del agua dentro de la red es una de las razones por las cuales no se puede predecir con facilidad cuándo o bajo qué condiciones se puede generar un evento de desprendimiento.

El objetivo principal de este artículo es desarrollar una metodología para proponer reglas de operación de redes de distribución de agua potable, que sean efectivas para el control del crecimiento de películas biológicas o minerales adheridas a la pared de la tubería, así como prevenir su desprendimiento en condiciones especiales de operación. Con esto se quiere dar herramientas a las empresas encargadas de la operación de las redes de distribución para minimizar el riesgo de deterioro de la calidad del agua y evitar reclamos de parte de los clientes, mantener el suministro en todos los escenarios de operación, impedir la presencia de patógenos en el agua y evitar la aparición de enfermedades.

De otro lado, este proyecto busca integrar el uso de modelos hidráulicos con la operación de la red, para evaluar los posibles efectos hidráulicos que genera un cambio en la operación antes de que el cambio se haga efectivo. Con esto se puede identificar vulnerabilidades, en este caso para el desprendimiento de material adherido a la tubería, y tomar decisiones con respecto a la operación de la red con el fin de minimizar los impactos negativos en la prestación del servicio.

BIOPELÍCULAS Y PELÍCULAS MINERALES EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

En un sistema de distribución, el agua potable sufre importantes cambios de calidad en el recorrido desde la planta de tratamiento al consumidor final. Aunque lo ideal es prevenir el deterioro del agua que llega a los consumidores, factores como la edad y material de las tuberías, condiciones hidráulicas de operación y posibles infiltraciones hacen que el agua potable sufra importantes cambios en sus propiedades químicas y microbiológicas.

El estado real del interior de la tubería se puede conocer utilizando técnicas complejas que interfieren con la prestación del servicio. Durante los eventos de coloración, la empresa prestadora del servicio y los clientes pueden tener una evidencia de la acumulación de material dentro de las tuberías. De acuerdo a Vreeburg & Boxall (2007) estas partículas tienen diferentes orígenes, ya sea desde el agua cruda que el tratamiento no elimina o la infiltración de material durante su transporte, que definen su tamaño y densidad. De la misma forma, la acumulación de estas partículas está relacionada al material de la tubería, la hidráulica de la red y para el caso de películas biológicas, la disponibilidad de nutrientes.

Entre los efectos que puede tener el crecimiento de películas en el interior de las tuberías de las redes de distribución de agua potable están los efectos biológicos, fisico-químicos e hidráulicos. Los efectos biológicos se basan en el incremento de poblaciones de microorganismos presentes en el agua, corrosión inducida por microorganismos, coloración roja o negra del agua resultado de la actividad de bacterias reductoras de hierro o sulfatos. Asociados con éstos, los cambios físicos y químicos más

importantes son la disminución de la concentración de desinfectante residual, la disminución de la concentración de oxígeno disuelto, olor y sabor desagradable. Por último, la presencia de películas minerales o biológicas puede ocasionar variaciones en la rugosidad hidráulica con efectos en las pérdidas de energía por fricción y disminución de la vida útil de la tubería, al tiempo que se reduce su capacidad hidráulica (Techneau, 2007).

Los mecanismos de desprendimiento de biopelículas y películas minerales son principalmente la abrasión, la erosión, el desprendimiento en masa y la depredación (Reyes del Toro, 2004; Rittman & McCarty, 2001; Escovar Bernal, 2009), en los cuales los esfuerzos cortantes y la disminución de la fuerza interna de la biopelícula son los factores que favorecen el desprendimiento. El cambio en las condiciones hidráulicas en las redes de distribución del agua potable puede causar el desprendimiento de las películas (biológicas o minerales) que están adheridas a la pared de la tubería. Altas velocidades en la red de distribución de agua potable causan turbulencia dentro de la tubería y esfuerzos cortantes entre la película y el agua en movimiento, suficientes para causar el desprendimiento de la biopelícula y películas minerales. La suspensión de partículas tanto minerales como biopelículas se reconoce de forma inmediata por el cambio de color del agua que sale del grifo del consumidor.

La acumulación de biopelículas y depósitos minerales en el interior de las tuberías de las redes de distribución es casi inevitable; además, el desprendimiento de biopelículas o depósitos minerales es un evento que es muy difícil de predecir y su efecto en la red es inmediato. Como se mencionó anteriormente, la contribución del consumidor en el control de la calidad del agua que llega a cada cliente es imprescindible, ya que aunque en la empresa se conoce la calidad del agua a la salida de la planta de potabilización, es muy poca la información disponible de la variación de la calidad del agua en su recorrido por la red (Teasdale, O'Halloran, Doolan, & Hamilton, 2007).

MODELACIÓN HIDRÁULICA DE LA OPERACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

Las redes de distribución tienen miles de configuraciones de funcionamiento, al combinar las diferentes posibilidades que se tienen con la gran cantidad de elementos que la componen, como tuberías, válvulas, tanques, plantas de tratamiento, estaciones de bombeo, estaciones de regulación de presión, entre otras (Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados-CIACUA, 2009). El esquema de operación ideal debe tener en cuenta en la optimización variables económicas, sociales, ambientales, técnicas entre otras, en las cuales debe ser primordial mantener la calidad del agua dentro de la red.

Los eventos de coloración, que pueden ocasionar quejas de los usuarios, se relacionan principalmente con eventos hidráulicos que ocasionan inestabilidad en la operación normal de la red. Algunos de estos eventos típicos son (Vreeburg & Boxall, 2007; National Research Council, 2006) fallas en tuberías o accesorios, operación de válvulas e hidrantes, procesos de llenado de tanques, variaciones en el bombeo y sobrepresiones, cambios sustanciales en la demanda de los sectores, y cambios en los tanques o en la forma cómo se alimenta la red matriz.

Estos cambios que pueden causar aumentos de velocidad y cambios en la dirección del flujo que pueden socavar los sedimentos, tubérculos e incrustaciones presentes en el interior de la tubería y deteriorar la calidad del agua. De la misma forma, las actividades relacionadas con el mantenimiento, preventivo o correctivo, deben ser analizadas antes de su aplicación para evaluar la forma de implementación con la que se minimicen los efectos en la calidad del agua y prestación del servicio.

De acuerdo con el análisis de la información encontrada en literatura especializada, los criterios que se proponen para evitar el desprendimiento de películas en redes de distribución de agua potable son, en

todos los casos: la velocidad debe ser menor a 1.8 m/s, siguiendo las recomendaciones de la AWWA, evitar cambios de velocidad en las tuberías que superen el doble de la velocidad inicial y evitar cambios de dirección del flujo en cualquier tubería, independiente de la velocidad inicial y final.

Con el fin de evaluar el comportamiento de diferentes redes frente a cambios que típicamente ocurren en sistemas de distribución de agua potable se evaluaron dos escenarios posibles: el aumento en la demanda de uno de los nudos de la red, que por ejemplo puede ser mayor consumo de agua para atender un incendio; y el cierre de un tubo completamente, que se puede presentar en una red por operaciones de mantenimiento o reparaciones de las tuberías.

Se utilizaron cuatro redes con condiciones distintas de distribución, topografía, topología, demanda de agua potable, entre otras características que afectan la hidráulica y calidad del agua. Estas redes fueron facilitadas por el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados-CIACUA de la Universidad de Los Andes y su diseño se optimizó con el programa REDES desarrollado por el mismo centro de investigación; las redes son R 28 con un tanque de distribución, R 28 con dos tanques de distribución, San Vicente y Andalucía Alta.

En la Tabla 1 se presentan las características de las redes utilizadas en la simulación de distintas condiciones de operación. En este caso, dos de estas redes eran completamente cerradas, por lo tanto muy redundantes. Otras condiciones que diferencian las redes son la topografía, el número de tanques que alimenta la red, y el tamaño de la red, según la cantidad de nudos y tuberías en la red.

Tabla 1.- Características redes utilizadas.

Red	Configuración	Número de tanques	Número de nudos	Número de tuberías	Diámetros (mm)
R 28 con 1 tanque	Cerrada, plana, teórica	1	40	67	50-200
R 28 con 2 tanques	Cerrada, plana, teórica	2	40	67	50-250
San Vicente	Abierta, con topografía variable	1	63	71	50-300
Andalucía Alta	Abierta, con topografía variable	1	330	360	50 -300

A continuación, en las Figuras 1 a 4 se muestran los esquemas de las diferentes redes, en los cuales se señalan el nodo al cual se aumenta su demanda base y el tubo que se cierra completamente. Para las redes R 28, adicionalmente, se muestran los valores de la velocidad en operación normal de la red, junto con las flechas que indican la dirección del flujo. Para las redes San Vicente y Andalucía Alta (redes reales de los municipios San Vicente Ferrer, en Antioquia, y Andalucía Alta, en el Valle del Cauca, Colombia), se muestran las curvas de nivel que muestran la topografía de la zona, junto con las flechas que indican la dirección del flujo. La selección del nodo y la tubería que son modificados se realizó de forma tal que se presentaran cambios considerables en la magnitud y la dirección del flujo en la red, especialmente en la zona redundante para las redes abiertas.

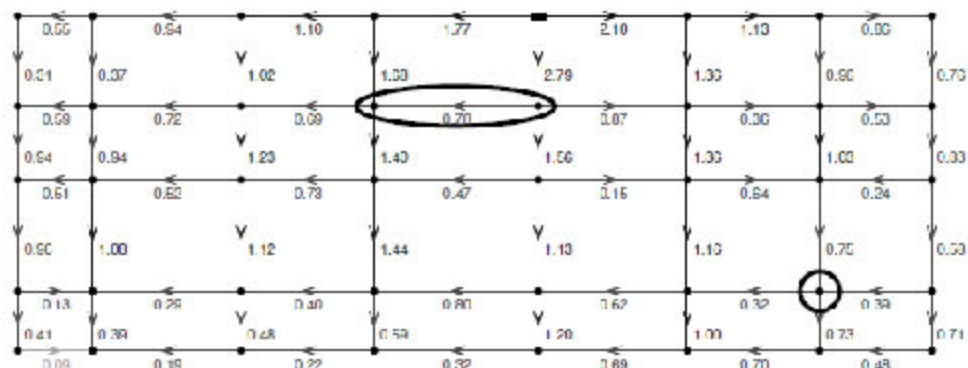


Figura 1.- Velocidades (m/s) y dirección de flujo en operación normal, señalando el nodo y el tubo modificado de la Red R28.

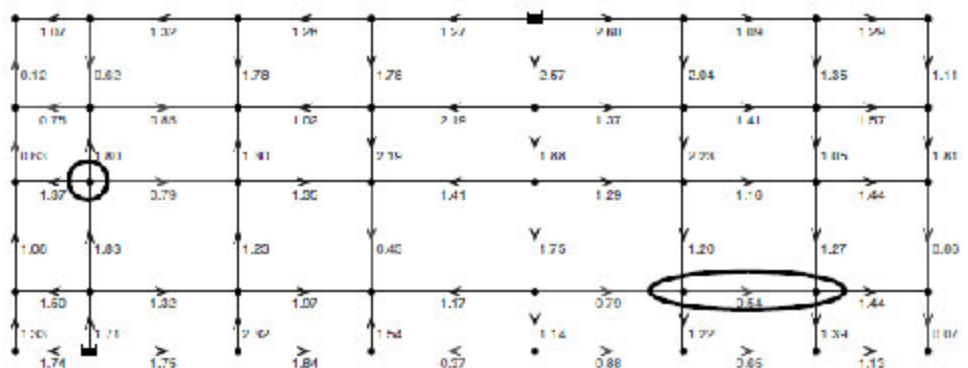


Figura 2.- Velocidades (m/s) y dirección de flujo en operación normal, señalando el nodo y el tubo modificado de la Red R28 con 2 tanques.

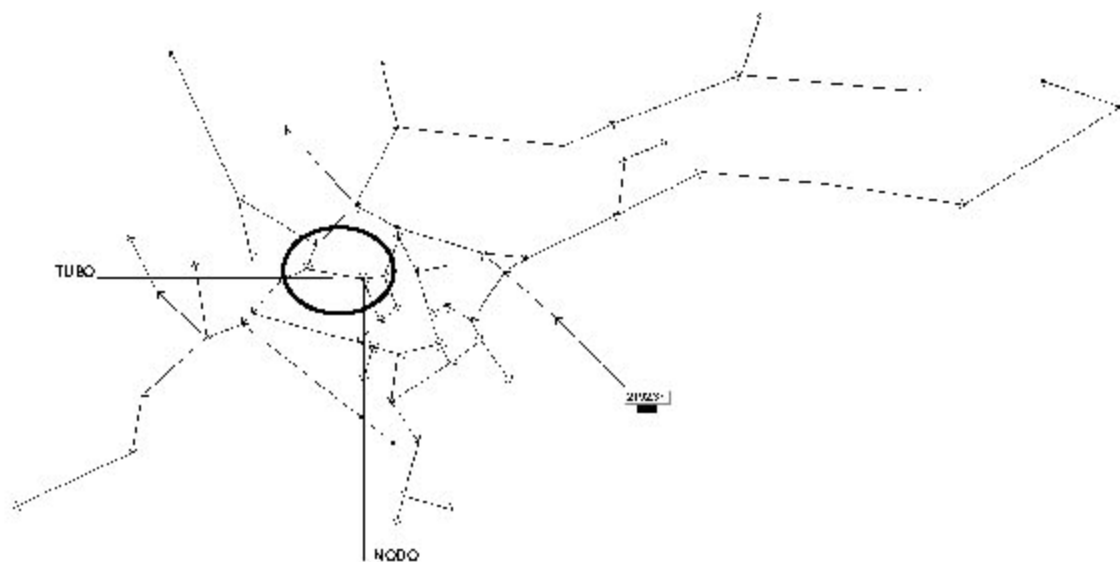


Figura 3.- Dirección de flujo en operación normal, señalando el nodo y el tubo modificado de la Red San Vicente.

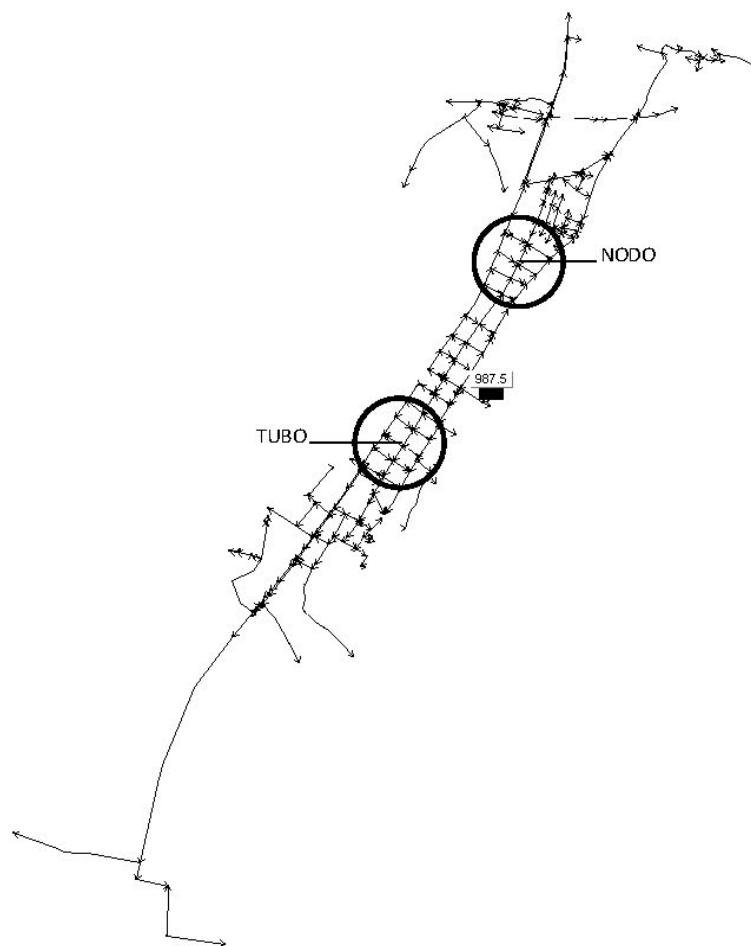


Figura 4.- Dirección de flujo en operación normal, señalando el nodo y el tubo modificado de la Red Andalucía Alta.

La metodología que se utilizó consiste en comparar la hidráulica de cada una de las redes bajo diferentes escenarios de operación. Primero se hace una simulación en el estado de operación normal de la red, el cual se considera el estado base. De otro lado, se hace la simulación hidráulica de la red incluyendo las variaciones en la operación, ya sea el cierre de una tubería o el aumento de la demanda en un nodo. En este escenario se evalúan los cambios de velocidad y dirección del flujo que genera el cambio de operación al hacer la comparación de los resultados con el escenario base. El tercer escenario es aquel que incluye la configuración de apertura de válvulas para cada tubería, resultado de la aplicación de algoritmos genéticos. En este último escenario se evalúan los efectos de la operación de las válvulas en la velocidad y dirección de flujo, y se hace una comparación con el escenario base.

Con esto se busca comparar el efecto de las modificaciones en el comportamiento de la red y el beneficio de la operación de las válvulas para controlar aumentos de velocidades y cambios en la dirección de flujo, condiciones que pueden promover el desprendimiento del material adherido a las paredes de la tubería. En la Tabla 2 se muestran los coeficientes de pérdidas menores asignados a cada tubería para simular, en el modelo hidráulico, la presencia de una válvula y su porcentaje de apertura.

Tabla 2.- Coeficientes de pérdidas menores según % de apertura de la válvula.

	Diámetros (mm)	50	75	100	150	200	250	300
% apertura de la válvula	0.1	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
	25	16.64	16.54	16.46	16.29	16.21	16.21	16.11
	50	13.26	13.06	12.91	12.56	12.41	12.41	12.21
	75	9.88	9.58	9.35	8.83	8.60	8.60	8.30
	100	6.50	6.10	5.80	5.10	4.80	4.80	4.40

Para realizar la simulación del comportamiento de una red e identificar las tuberías en las que se presentan los mayores cambios en la magnitud o dirección de flujo bajo los escenarios descritos anteriormente, se realizó la modelación hidráulica en EPANET (Rossman, 2000). Este programa se utilizó de forma simultánea con el programa de optimización con algoritmos genéticos: GANetXL Versión 1.0.4.0 desarrollado en el Centro de Investigación en Sistemas de Agua, Centre for Water Systems de la Universidad de Exeter (Universidad de Exeter Centre for Water Systems, 2006). La configuración de los criterios utilizados en la optimización con algoritmos genéticos se muestra en la Tabla 3; para cada configuración de cada red se realizaron 2,000 generaciones.

Tabla 3.- Configuración de algoritmos genéticos.

Criterio	Configuración
Tipo de algoritmo genético	Objetivo simple
Tamaño de la población	100 individuos
Algoritmo	Generacional
Método de Reproducción o Recombinación (<i>Crossover</i>)	Simple, en un punto con una tasa de 0.95
Método de Selección	Ruleta
Método de Mutación	Simple con una tasa de 0.05

La función objetivo se seleccionó analizando los resultados obtenidos con las siguientes opciones:

$$F.O.1 = \sum \frac{v_{final,i} - v_{inicial,i}}{v_{inicial,i}} \quad [1]$$

$$F.O.2 = \sum \left| \frac{v_{final,i} - v_{inicial,i}}{v_{inicial,i}} \right| \quad [2]$$

Estas funciones objetivo evalúan el cambio de la velocidad en cada tubería antes y después de realizar el cambio en la operación de la red. Después de comparar los resultados en las diferentes redes, se obtuvo que al evaluar el cambio de la velocidad con el mismo peso tanto para velocidades que aumentan como que disminuyen, es decir incluyendo el valor absoluto (ver Ecuación 2), se obtienen mejores resultados. Por esta razón, la función objetivo que se utilizó en la optimización con algoritmos

genéticos es al Función Objetivo 2. Esta función objetivo se debe minimizar para disminuir las diferencias entre las velocidades antes y después de los cambios, es decir comparando los escenarios 1 y 2 y los escenarios 1 y 3. Entre mayor sea el valor de esta función, mayor es la diferencia entre las magnitudes de las velocidades de cada una de las tuberías.

Las demás restricciones que se aplicaron a la optimización con algoritmos genéticos incluyen mantener una presión mínima en la red, evitar el cambio en la dirección del flujo y controlar los cambios de velocidades. A cada una de estas restricciones se le asignó un valor de 1 cuando se incumple y un valor de 0 cuando se cumple (ver Tabla 4). Con esto se puede cuantificar la cantidad de restricciones no cumplidas para cada uno de los casos.

Tabla 4.- Valor asignado según condición de las restricciones.

Restricción	1	0
Presión	Menor a 15 mca	Mayor a 15 mca
Contra flujo	Si se presenta	No se presenta
Velocidad final duplica el valor de la velocidad inicial	Si	No
Velocidad final mayor a 1.8 m/s	Si	No

Donde mca representa metros de columna de agua.

RESULTADOS

Después de realizar el procedimiento de optimización de apertura de válvulas con algoritmos genéticos, los resultados de las mejores configuraciones se muestran en la Tabla 5 para condiciones de aumento de demanda en un nodo y en la Tabla 6 para la condición de cerrar completamente un tubo.

El escenario 1-2 se refiere a la comparación entre las condiciones iniciales y después del cambio en la operación; mientras que el escenario 1-3 compara las condiciones iniciales con las condiciones hidráulicas de la red incluyendo los porcentajes de apertura de válvulas de mejor resultado alcanzado con los algoritmos genéticos.

Tabla 5.- Resultados para simulación de aumento de demanda en un nodo.

Red	Número de válvulas operadas en la red	Valor función objetivo		Restricciones no cumplidas	
		1-2	1-3	1-2	1-3
R 28 con 1 tanque	75%	9.63	4.82	5	3
R 28 con 2 tanques	60%	5.09	3.78	23	16
San Vicente	70%	7.61	5.68	6	3
Andalucía Alta	50%	3.71	2.62	8	1

Tabla 6.- Resultados para simulación de cerrar tubo.

Red	Número de válvulas operadas en la red	Valor función objetivo		Restricciones no cumplidas	
		1-2	1-3	1-2	1-3
R 28 con 1 tanque	60%	13.72	7.87	8	5
R 28 con 2 tanques	50%	0.39	2.49	20	15
San Vicente	30%	41.44	36.24	19	16
Andalucía Alta	30%	13.28	12.54	12	11

En estos casos se puede observar que para todas las redes disminuyen las restricciones no cumplidas entre los diferentes escenarios. Sin embargo, no siempre se logra minimizar el valor de la función objetivo, es decir, no se está disminuyendo el cambio porcentual de la velocidad.

De la misma forma, se puede observar que el porcentaje de válvulas que se deben operar en cada red es muy alto, lo que no es conveniente en la práctica por los costos asociados con la operación de las válvulas en el sistema. En este caso la diferencia que genera operar las válvulas puede no ser suficiente para que se justifique la inversión económica de la operación de la cantidad de válvulas sugerida.

Evaluación de Escenario Limitado

Según los resultados anteriores, si se evalúa la red de forma completa, se debe operar un gran número de válvulas comparado con el número total de válvulas instaladas en la red. Como esto no es eficiente para el caso de una respuesta inmediata y requiere de una alta disponibilidad de recursos, se volvió a evaluar uno de los casos anteriores, pero limitando el número de válvulas a operar según su cercanía a la tubería modificada. Los resultados que se obtuvieron se presentan a continuación.

El caso que se estudió es el escenario de cerrar un tubo en la red R 28 de un solo tanque. En la Figura 1 se muestran las condiciones después del cambio y se señalan las tuberías cuyas válvulas se van a operar. En total, se pueden modificar únicamente 16 válvulas de las 67 instaladas en la red. Estas válvulas se seleccionaron por su cercanía al tubo modificado, considerando que son las que puede sufrir mayores cambios y tener mayor efecto en el sistema con el cambio propuesto.



Figura 5.- Velocidades (m/s) y dirección de flujo en operación normal de la red R28.

Luego de realizar la optimización con algoritmos genéticos, los resultados de la función objetivo y las restricciones no cumplidas se muestran a continuación en la Tabla 7.

Tabla 7.- Valor de la Función objetivo – R28 Cerrar Tubo.

Escenario inicial – Escenario final	Valor Función Objetivo	Restricciones no cumplidas
Inicial – Con cambio	13.72	8
Inicial – Con operación de 67 válvulas	7.87	5
Inicial – Con operación de 16 válvulas	10.49	5

Al tener una restricción de válvulas que se pueden operar, se alcanza la misma cantidad de restricciones no cumplidas que con la opción de operar todas las válvulas de la red. De igual manera se logra disminuir el valor de la función objetivo de 13.72 a 10.49, que aunque no es menor a 7.87, se están atendiendo las tuberías más vulnerables al cambio de operación generado.

En la Figura 6 se muestra la configuración de velocidades de la red junto con las válvulas que se deben cerrar y su porcentaje final de apertura sin restricciones de número de válvulas a operar. En ésta se ve como la metodología implementada incluye el cierre de válvulas ubicadas en tuberías lejanas a la zona de cambio. De otro lado, la Figura 7 muestra los resultados para el escenario en el cual solo se operan las válvulas cercanas al sitio de cambio de operación. Con esto se puede ver el poco efecto que tiene la operación de las válvulas lejanas al sitio crítico, que además de ser costoso es poco eficiente. En los dos casos, se puede ver que el cierre de las válvulas no evita el cambio de la dirección de flujo en la tubería indicada en la Figura 6; este debe ser un punto de control para verificar el posible desprendimiento de material adherido a la tubería.

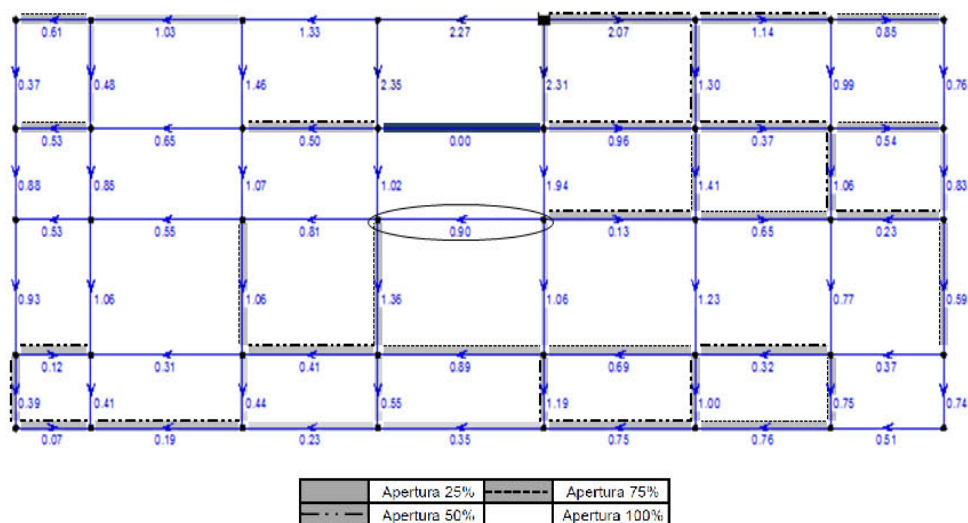


Figura 6.- Velocidades y configuración apertura de válvulas para R 28 sin limitación de válvulas.

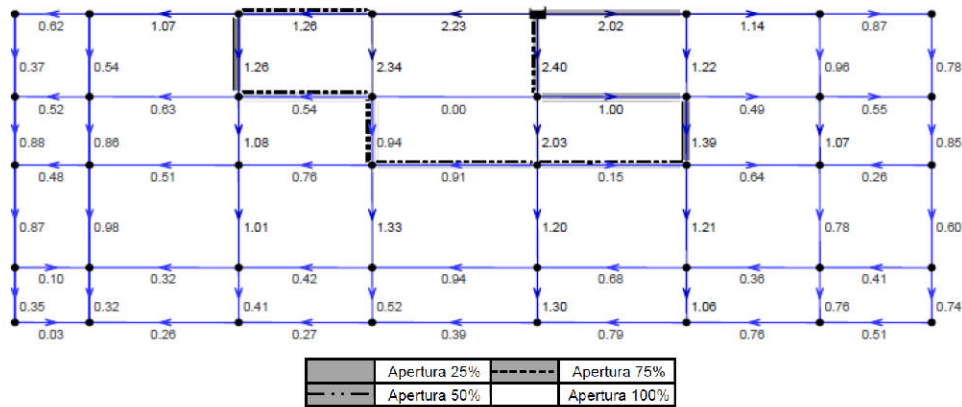
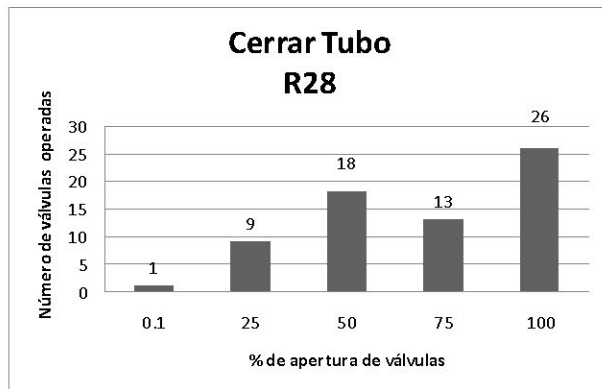
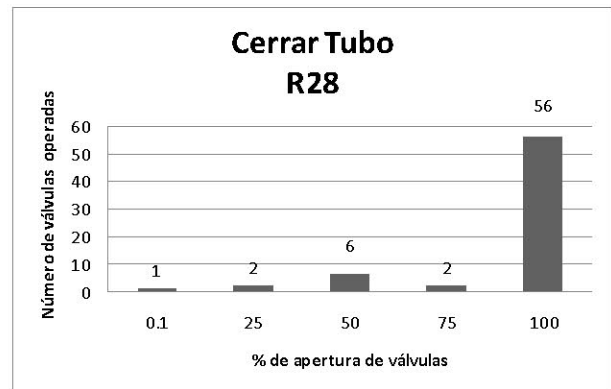


Figura 7.- Velocidades y configuración apertura de válvulas para R 28 con limitación de válvulas.

Asimismo, la diferencia en el número total de válvulas operadas se muestra en la Figura 8, pasando de 40 válvulas que se deben cerrar (Ver Figura 8.a.) en algún porcentaje a únicamente 10 (Ver Figura 8.b.), que indica el número de válvulas según el porcentaje de apertura de la válvula ubicada en la tubería.



a. Número ilimitado de válvulas operadas



b. Número limitado de válvulas

Figura 8.- Número de válvulas operadas según porcentaje de apertura.

En la Figura 9 se muestra la comparación de los resultados de los tres escenarios evaluados: el escenario de cambio de operación, el escenario de configuración de apertura de válvulas sin restricciones y el escenario de configuración de apertura de válvulas sectorizada, con respecto al escenario base. Hay que recordar que un porcentaje de cambio de velocidad mayor a 100 indica que hay un riesgo potencial alto de desprendimiento de películas adheridas a la pared de la tubería. En la gráfica se observa que los valores más altos del cambio de velocidad se controlan con la operación de las válvulas en los dos casos. En el caso del escenario con operación de válvulas sectorizadas se ve que los picos disminuyen, lo que indica que los mayores cambios de velocidad se controlan y en todos los casos se obtienen valores menores al 100%. Esto significa que con la operación de las válvulas se hace un control efectivo en la magnitud de la velocidad y se eliminan los sitios vulnerables al desprendimiento de material.

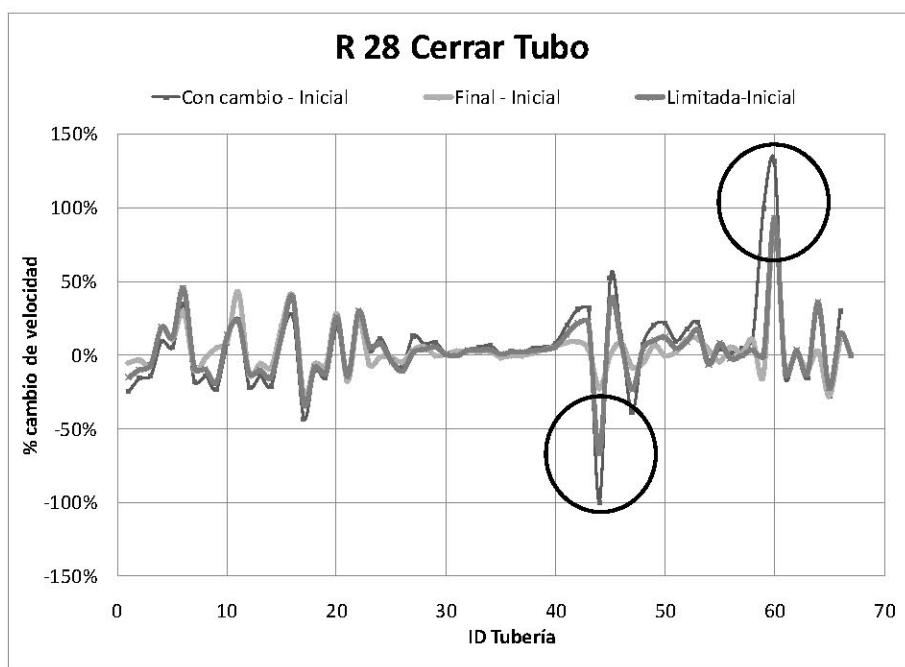


Figura 9.- Comparación de escenarios Red R 28 Cerrar tubo.

Con la posibilidad de operar las 67 válvulas instaladas en la red, se logra disminuir de mayor forma las diferencias generales de velocidad con respecto a la configuración inicial, pero estos cambios se pueden considerar que no son tan representativos para evaluar el riesgo de desprendimiento de biopelículas y minerales adheridos a la pared de la tubería. Esto indica que es adecuado limitar el número de válvulas a operar en el proceso de optimización, logrando buenos resultados con menores recursos invertidos. Esto se logra con la sectorización de la red, de forma tal que dentro de una misma red se puedan operar sectores de forma independiente con un manejo más eficaz de los recursos.

CONCLUSIONES

El desprendimiento de biopelículas o depósitos minerales es un evento que es muy difícil de predecir y su efecto en la red es inmediato. En este caso, la modelación hidráulica permite simular el comportamiento de la red frente a diferentes configuraciones de operación y a partir de los resultados tomar medidas de mitigación de impactos en la prestación del servicio.

Con la metodología implementada, se logra disminuir el riesgo de provocar deterioro del agua potable, ya que se minimiza el cambio de velocidades entre configuraciones de operación, manteniendo el suministro de agua de la demanda base para todos los nudos cumpliendo con las restricciones de presión mínima. En todos los casos se debe evitar aumentos súbitos de la velocidad y cambios en la dirección del flujo, dado que son condiciones de alto riesgo de desprendimiento del material adherido a la pared de la tubería.

Los resultados que se obtuvieron demuestran que no hace falta operar todas las válvulas de una red para minimizar los efectos de un cambio de operación en una zona particular. Limitando el número de válvulas que se pueden operar, se obtienen resultados igualmente buenos con menores costos y uso de recursos asociados con la operación de las válvulas.

Este proyecto es una aproximación particular al problema del desprendimiento de biopelículas en redes de distribución de agua potable. Es importante seguir con esta investigación para que las empresas

encargadas del suministro de agua potable cuenten con herramientas que permitan mejorar las condiciones de operación y así evitar eventos de deterioro de la calidad del agua que llega al consumidor final.

BIBLIOGRAFÍA

Álvarez, L. (2009). Propuesta de una metodología para el diseño optimizado de lavados hidráulicos unidireccionales en redes de distribución de agua potable. Bogotá: *Tesis de Maestría Universidad de Los Andes*.

Barton, A. F., Wallis, M. R., Sargison, J. E., Buia, A., & Walker, G. J. (2008). Hydraulic Roughness of Biofouled Pipes, Biofilm Character, and Measured Improvements from Cleaning. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134 (6), 852-857.

Batté, M., Appenzeller, B., Grandjean, D., Fass, S., Gauthier, V., Jorand, F., y otros. (2003). Biofilms in drinking water distribution systems. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2, 147-168.

Besner, M., Gauthier, V., Trépanier, M., Martel, K., & Prévost, M. (2007). Assessing the effect of distribution system O&M on water quality. *American Water Works Association Journal*, 99 (11), 77-91.

Boe-Hansen, R. (2001). Microbial growth in drinking water systems. Copenhagen, Dinamarca: *DHI Water & Environment, Environment & Resources Technical University of Denmark*.

Carrière, A., Gauthier, V., Desjardins, R., & Barbeau, B. (2005). Evaluation of loose deposits in distribution systems through unidirectional flushing. *Journal AWWA*, 9 (97), 82-92.

Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados-CIACUA. (2009). Investigación sobre los factores que generan la formación, crecimiento y posterior desprendimiento de biopelículas en las redes matrices de acueductos Fase I. Bogotá.

Escovar Bernal, M. A. (2009). Reglas de Operación para el Desprendimiento de Biopelículas en sistemas de Distribución de Agua Potable. Bogotá: *Tesis-Universidad de Los Andes*.

López, S. (2003). Diseño de redes de Distribución de Agua Potable de Mínimo Costo con Algoritmos Genéticos. Bogotá: *Tesis Universidad de Los Andes*.

National Research Council. (2006). Drinking Water Distribution Systems: Assessing and Reducing Risks. Washington D.C.: *The National Academies Press*.

Reyes del Toro, P. (2004). Aspectos Hidráulicos para el Lavado de Redes de Distribución de Agua Potable. Bogotá, Colombia: *Tesis Universidad de Los Andes*.

Rochex, A., Godon, J.-J., Bernet, N., & Escudé, R. (2008). Role of Shear Stress on Composition, Diversity and Dynamics of Biofilm Bacterial Communities. *Water Research*, 42, 4915-4922.

Rossman, L. (2000) Epanet 2. User Manual. *U.S. Environmental Protection Agency (EPA)*. Disponible en :< <http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/dw/epanet/EN2manual.PDF>>

Ryan, G., Mathes, P., Haylock, G., Jayaratne, A., Wu, J., Noui-Mehidi, N., y otros. (2008). Particles in Water Distribution Systems. Australia: *The Cooperative Research Centre for Water Quality and Treatment*.

Saldarriaga Valderrama, J. G. (2007). Hidráulica de tuberías: abastecimiento de agua, redes, riegos . Bogotá, D.C.: *Alfaomega: Uniandes*. ISBN: 9789586826808

- Stoodley, P., Cargo, R., Rupp, C., Wilson, S., & Klapper, I.** (2002). Biofilm Material Properties as Related to Shear-Induced Deformation and Detachment Phenomena. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 29, 361-367.
- Stoodley, P., Wilson, S., Cargo, R., Piscitelli, C., & Rupp, C.** (2001). Detachment and other dynamic processes in bacterial biofilms. Bozeman, Montana: *Sources in Biomaterials Foundation*.
- Teasdale, P., O'Halloran, K., Doolan, C., & Hamilton, L.** (2007). Literature Review On Discoloured Water Formation and Desktop Study of Industry Practices. Australia: *Cooperative Research Centre for Water Quality and Treatment*.
- Techneau.** (2007). Particles in relation to water quality deterioration and problems in the network: State of the art review. D 5.5.1 + D 5.5.2.
- Universidad de Exeter Centre for Water Systems.** (2006). GANetXL Versión 1.0.4.0.
- Vreeburg, J., & Boxall, J.** (2007). Discolouration in Potable Water Distribution Systems: A Review. *Water Research*, 41, 519-529.
- Whelton, A., Dietrich, A., Gallager, D., & Roberson, A.** (2007). Using consumer feedback for improved water quality and infrastructure monitoring. *AWWA Journal*, 99 (11), 62-76.