

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SETIEMBRE DE 2012**

**EL MÉTODO DE FLUJO EN REDES APLICADO AL CASO DEL LAVADO
DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE**

Diva P. Rubio, Eric Rothstein, Silvia Takahashi

*Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA), Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental,
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia*

<dp.rubio50@uniandes.edu.co>, <e-rothst@uniandes.edu.co>, <stakahas@uniandes>

RESUMEN:

Muchos problemas de optimización en ingeniería pueden resolverse haciendo uso de diseño de algoritmos. Estos problemas generalmente son dirigidos por profesionales en el campo de acción específico del problema quienes no tienen conocimientos suficientes de teoría de algoritmos. Por otro lado, los informáticos muchas veces solucionan problemas teóricos que no pueden ser fácilmente aplicados en la vida real. El mejor enfoque es tener equipos interdisciplinarios que aborden los problemas del mundo real y tratar de resolverlos mediante la aplicación de técnicas algorítmicas conocidas. Uno de los campos en los que se ha demostrado que esta colaboración prueba ser fructífera es en los problemas relacionados con sistemas de distribución de agua. En este trabajo se aborda el problema de lavado unidireccional para garantizar la calidad del agua mediante modelación como la suma de subconjuntos de problemas NP-difícil. El problema de lavado unidireccional (UDFP) indica que válvulas e hidrantes deben ser operados para llevar a cabo un lavado de la red de distribución de agua potable (RDAP).

ABSTRACT:

Several optimization problems in engineering can be solved when applying algorithm design. These problems, however, are addressed by professionals who know little regarding the theory of algorithms. Computer scientists know about algorithms, but most of them focus on theoretical problems that cannot be applied to real-world situations. Having interdisciplinary teams is probably the best approach, teams in which algorithm techniques are applied to all kinds of situations. This approach has been applied to water distribution system (WDS) problems, and the results obtained are fruitful. This paper addressed the problem of unidirectional flushing in systems. It also seeks to ensure water quality, modeling it as the subset sum NP-hard problem. Unidirectional flushing problem, or UDFP, shows which valves and hydrants should be operated to perform a better WDS flushing.

PALABRAS CLAVES: lavado, hidrantes, válvulas, algoritmo de aproximación, sistema de distribución de agua potable

INTRODUCCIÓN

En las redes de distribución de agua potable (RDAP) es importante garantizar la calidad del agua suministrada para el consumo. Se deben mantener las propiedades físico-químicas adecuadas a lo largo del recorrido de la red y hasta llegar a los usuarios. La calidad del agua se ve afectada por diversos factores como: la entrada de material orgánico e inorgánico desde la fuente de abastecimiento, el desprendimiento de capas minerales y biopelículas en las tuberías, depósitos de sedimentos en puntos específicos, entre otros.

El lavado de tuberías es uno de los métodos más empleados en el mantenimiento y mejoramiento de la calidad del agua en las RDAP. La técnica de lavado para la red de distribución que presente problemas de calidad de agua debe ser seleccionada mediante la consideración del tipo de tubería, el tamaño de la tubería, el tipo de problema específico a solucionar, o combinaciones de ellos. Adicionalmente cada técnica presenta un tiempo estimado de beneficio debido al impacto que ésta tiene sobre la tubería y así mismo presenta una relación de costos distinta. Entre las distintas técnicas o métodos existentes para la limpieza de tuberías se presentan lavados hidráulicos que requieren de un aumento de la velocidad para aumentar el esfuerzo cortante y así limpiar el conducto de la tubería; este lavado puede ser convencional o unidireccional y no requiere de una suspensión del servicio; lavados, que requieren el vaciado de las tuberías, por medio del flujo de aire a presión o por medio de sistemas mecánicos que incluyen la conducción de esponjas o émbolos que limpian el conducto; limpieza química o manual y revestimiento de tuberías (Gómez, 2010).

El lavado unidireccional en RDAP es una estrategia económicamente viable que ha venido siendo empleada en la solución de problemas tanto operativos como de calidad del agua. El lavado unidireccional tiene las siguientes ventajas para la RDAP: incremento en la velocidad, remoción de depósitos minerales y biológicos, control de sabor y olor, reducción de la turbidez, reducción de la frecuencia de lavado, ahorro de agua usada en el lavado y reducción de costos en comparación con el lavado tradicional. En la actualidad existen diferentes metodologías y software para obtener y simular planes de lavado unidireccional (UDFP), pero estas metodologías presentan limitaciones como la necesidad de expertos que conozcan la red para tener una mejor solución, la falta de garantías para encontrar la solución óptima y/o la necesidad del uso sistemas más complejos como los SIGs. En el presente trabajo se propone un algoritmo que evita o minimiza estos problemas permitiendo desarrollar el plan de lavado unidireccional siguiendo restricciones hidráulicas únicamente.

ANTECEDENTES

El lavado de RDAP es una estrategia económicamente viable que ha venido siendo empleada en la solución de problemas tanto operativos como de calidad del agua. Entre los problemas operativos asociados a la implementación de lavados están: el cambio de rugosidad, pérdidas de presión y el mantenimiento de válvulas. En cuanto a problemas de calidad se encuentran: crecimiento bacteriano, biopelículas, acumulación de sedimentos, corrosión y eventos de coloración. Adicionalmente, en la última década se han incrementado las investigaciones acerca de cómo sacar contaminantes rápidamente de la red, en parte, por el temor a ataques terroristas. El presente trabajo se enfoca en la parte operativa y de mantenimiento de la red empleando lavado hidráulico unidireccional.

En 1998 la American Association Research Foundation (AWWARF) presentó el estudio de como mantener la calidad del agua en un sistema de distribución a partir del programa de cuatro pasos de lavado: (1) Determinar la conveniencia del lavado como parte del programa de mantenimiento del sistema, (2) Planear y manejar el programa de lavado, (3) Implementar el programa de lavado y recolección de datos y (4) Evaluar y revisar el proceso. El lavado con flujo unidireccional surgió a principios de los 90's como un refinamiento al lavado convencional; Antoun

(1999) presenta un resumen del lavado unidireccional en tuberías, de las técnicas claves, de los potenciales beneficios y explora como UDF encaja en los esfuerzos para controlar la calidad del agua de sistema de distribución de agua. Friedman (2002) proporciona una justificación y directrices para la evaluación de programas de lavado, así mismo, suministra consejos para identificar si el lavado es apropiado y en caso de que lo sea como debe ser su planeación, implementación y manejo del programa. Reyes (2005) evalúa la eficiencia de remoción de lavados y el comportamiento de pérdidas de energía a través del tiempo. En los trabajos de Boxal (2005) y Vreeburg (2007) se evidencia la necesidad de un modelo de calidad de la red para evitar manejar el lavado únicamente como una buena práctica de gerencia de RDAP y aprovechar sus beneficios para obtener resultados óptimos de calidad. Poullin (2008) propone una aproximación heurística que hace uso de la topología de la red para aislar áreas contaminadas e identificar que válvulas cerrar. Preis (2008) desarrolla un modelo multiobjetivo que incluye como minimizar la masa contaminada y como a su vez minimizar el número de actividades operacionales para contener y lavar los contaminantes del sistema. Alfonso (2010) presenta una metodología para encontrar grupos de intervenciones operacionales en redes de distribución para minimizar el impacto en la población al tener eventos de contaminación.

Como se puede ver, en la actualidad existen diferentes metodologías y software para obtener y simular planes de lavado unidireccional UDFP, entre los que se encuentran: El modulo de UDF del programa WaterGEMS; la metodología propuesta por Álvarez (2009) que hace uso de algoritmos genéticos (AG); y el software InfoWater UDF. Entre los problemas asociados con las metodologías existentes está la necesidad de expertos que conozcan la red para tener una mejor solución, la falta de garantías para encontrar la solución óptima y/o la necesidad del uso sistemas más complejos como SIG y costos de obtención de software. En el presente trabajo se propone un algoritmo que evita estos problemas permitiendo desarrollar el plan de lavado siguiendo restricciones hidráulicas.

MODELO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

Es necesario modelar correctamente la RDAP para dar una definición formal al problema de planeación de lavado unidireccional (UDFP). El modelo debe incluir los elementos necesarios y suficientes, debe ser claro y reflejar una buena abstracción de la realidad.

Se define la RDAP como un conjunto de nudos, tuberías, válvulas, hidrantes, aperturas de válvulas y aperturas de hidrantes mediante la siguiente 6-tupla (N, T, V, H, Pv, Ph) y cada uno de estos elementos requieren características específicas para la modelación.

- Nudos – N: Los nudos se clasifican en dos categorías fuentes y puntos de demanda. Las fuentes son nudos donde no hay consumo de agua y se necesita para su modelación conocer sus coordenadas y altura piezométrica. Los puntos de demanda o de consumo se caracterizan mediante sus coordenadas y demanda de agua.
- Tubos – T: Los son arcos que conectan los nudos de la RDAP. Para el modelo se requiere conocer el diámetro, la rugosidad, el coeficiente de fricción y el coeficiente de pérdidas menores.
- Válvulas – V: Son accesorios agregados al tubo para regular el flujo de agua. Este elemento se modela mediante dos características: el tubo donde se ubica y una función de comportamiento.
- Hidrantes – H: Elementos que se ubican en un nudo y permiten generar diferencia de presiones en la red y por lo tanto aumento de velocidad en tubos cercanos. Los hidrantes se representan en el modelo mediante el nudo en donde se ubican, el coeficiente del emisor y el exponente del emisor.
- Apertura de válvulas Pv: Es el conjunto de las posibles aperturas de las válvulas.
- Apertura de hidrantes Ph: Es el conjunto de las posibles aperturas de los hidrantes.

Adicionalmente, para la modelación se emplean diferentes configuraciones de la red. Cada configuración corresponde a un cambio en los estados de las válvulas o los hidrantes por lo que, cada configuración tiene dos conjuntos: el primero de cada válvula con su respectiva apertura y el segundo de cada hidrante con su respectiva apertura.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Se formula el problema de lavado unidireccional (UDFP) como un problema de decisión, en el cuál dada una RDAP, un conjunto de tubos, un conjunto de hidrantes, un conjunto de válvulas y algunas restricciones se decide si es posible o no lavar un/unos tubos dados modificando el estado de válvulas e hidrantes del sistema y asegurando que las restricciones se cumplan.

Los parámetros de entrada al problema son: la red de distribución de agua modelada como la 6-tupla antes mencionada, un valor mínimo de velocidad de agua en los tubos, un valor máximo de velocidad de agua en los tubos, la presión mínima de los nudos de la red, el mínimo número de válvulas a operar, el mínimo número de hidrantes a operar, el conjunto de aperturas que se evaluarán para las válvulas y el conjunto de aperturas que se evaluarán para los hidrantes. También se debe considerar que el plan de lavado sea físicamente posible para reproducirlo en campo. En primer lugar, la RDAP siempre debe proveer agua a todos los nudos, se debe evitar situaciones en las que se presente desconexión de nudos por cierre de válvulas. No se debe reducir la presión por debajo de una presión mínima permitida y finalmente la velocidad no debe ser mayor a la máxima establecida para evitar daños en el sistema.

El UDFP por ser un problema de decisión tiene como respuesta si se puede o no realizar el lavado, pero para esta investigación a esta respuesta se le asocia un conjunto de válvulas e hidrantes que al ser operados generan el lavado deseado en la RDAP. En conclusión el UDFP responde si existe una configuración de válvulas e hidrantes (V_a^* , H_a^*) de manera que al configurar la RDAP la velocidad en todos los tubos este acotada entre un valor mínimo y máximo dados, y además, en ningún momento un nudo presente presiones menores a la mínima establecida ni este desconectado del resto de la red.

METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

En primer lugar se identificó la dificultad del problema como un NP-Completo, lo que permite identificar qué algoritmos pueden darle solución. Según esta complejidad el problema de UDFP puede resolverse de forma exacta haciendo uso de un algoritmo exacto exponencial; sin embargo, esta solución no es eficiente ya que requiere una cantidad exponencial de tiempo para ser calculado, lo que implica que puede superar una cantidad de tiempo aceptable. El algoritmo propuesto en este trabajo es un algoritmo de aproximación de orden polinomial que pretende encontrar una configuración (V_a^+ , H_a^+) similar a la que se obtendría si se hiciera uso del algoritmo exacto exponencial (V_a^* , H_a^*), donde una configuración se refiere a un estado particular de cada una de las válvulas e hidrantes de la red. Para poder hacer esta aproximación al problema de lavado unidireccional UDFPA se requiere optimizar el conjunto de configuraciones.

Optimización: Se crea una función de influencia que sirve para medir que tanto afecta la configuración la RDAP; esta función hace uso de los valores de las velocidades en los tubos a lavar, donde la solución óptima (V_a^* , H_a^*) tiene un alto valor de influencia, y por lo tanto se busca una configuración (V_a^+ , H_a^+) con una influencia similar.

Zona de influencia: La función de influencia tiene una desventaja y es que no tiene en cuenta los rangos de velocidad mínima y máxima; por lo tanto pueden existir configuraciones con el valor de influencia adecuado pero que no sean solución. Para corregir esto se agregó una medida de comparación que permite asegurar sin error que dos configuraciones son similares. Esta medida realiza una comparación de la velocidad de los tubos de la red entre dos configuraciones haciendo

uso de un parámetro de precisión ϵ , permitiendo conocer si las dos configuraciones generan o no cambios similares en la RDAP.

Reducción del espacio de búsqueda: Para que el espacio de búsqueda de la solución sea de orden polinomial, el algoritmo de aproximación debe podar (quitar) algunos elementos que de antemano se sabe que no satisfacen el lavado. Las condiciones tenidas en cuenta para realizar estas podas fueron:

- Poda por déficit de presión: Se eliminan las configuraciones con déficit de presión y las que se derivan de esta.
- Poda por velocidad máxima: Por la forma del algoritmo si una configuración excede la velocidad máxima todas las que se derivan de ella serán aun mayores por lo tanto también se eliminan esos elementos.
- Poda por desconexión: Con esta poda se pretende descartar las configuraciones en las que algún nudo quedaría desconectado por el cierre de válvulas.

Algoritmo: A partir de las condiciones anteriores se planteó el algoritmo que evalúa un número de orden polinomial de configuraciones diferentes y encuentra la mejor configuración que sea similar a la que se obtendría con un espacio de búsqueda exponencial.

El algoritmo tiene como datos de entrada velocidad mínima, velocidad máxima, presión mínima, número mínimo de válvulas a operar, número máximo de válvulas a operar, posibles aperturas de válvulas, la red y el parámetro ϵ .

Luego, el algoritmo genera diferentes configuraciones según el número de hidrantes, válvulas y aperturas de válvulas que se tienen y va ordenando las diferentes configuraciones según el valor de influencia, realiza la reducción del espacio de búsqueda y finalmente retorna la configuración con el mayor valor de influencia.

El UDFPA explorará el conjunto de posibles configuraciones. Tendría que evaluar $|P_v|^{|V|} * |P_h|^{|H|}$ configuraciones diferentes; este número es exponencial, por esto se introducen podas en el algoritmo para poder reducir el espacio de búsqueda a uno polinomial; para esto se hace uso del factor de aproximación ϵ . El objetivo de UDFPA es entonces encontrar una configuración (V^+_a, H^+_a) para la cual se cumpla:

$$\begin{aligned} & (\forall t | t \in P: Vel^+(t) \leq Vel_{Max}) \wedge \\ & (\forall n | n \in N: Pres^+(n) \leq P_{Min}) \wedge \\ & \frac{inf((V_c^*, H_c^*))}{inf((V_c^+, H_c^+))} \leq 1 + \epsilon \end{aligned}$$

Sea $R = (N, P, V, H, P_v, P_h)$ la RDAP, ϵ el valor de aproximación (un valor real entre 0 y 1) y $Vel_{min}, Vel_{max}, P_{min}$, las restricciones de velocidad mínima, velocidad máxima y presión mínima el siguiente algoritmo se emplea para darle solución al UDFPA.

```

UDFPA ( $R = (N, P, V, H, P_v, P_h), Vel_{min}, Vel_{max}, P_{min}, \epsilon$ )
1.  $Configs \leftarrow \langle \{(v, 1) | v \in V\}, \{(h, 0) | h \in H\} \rangle$ 
2.  $i \leftarrow 0$ 
3. for each ( $v \in V, p_v \in P_v$ ) do
4.    $Configs \leftarrow \mathbf{Unir}(Configs, CVS(v, p_v, Configs))$ 
5.    $Configs \leftarrow \mathbf{OrdinaryFiltrar}(Configs)$ 
6.    $Configs \leftarrow \mathbf{Podar}(Configs, \frac{\epsilon}{2(|V||P_v| + |H||P_h|)})$ 
7.    $i \leftarrow i + 1$ 
8. for each ( $h \in H, p_h \in P_h$ ) do
9.    $Configs \leftarrow \mathbf{Unir}(Configs, CHS(v, p_h, Configs))$ 
10.   $Configs \leftarrow \mathbf{OrdinaryFiltrar}(Configs)$ 

```

11. $Configs \leftarrow \mathbf{Podar} \left(Configs, \frac{\epsilon}{2(|V||P_v| + |H||P_h|)} \right)$
12. $i \leftarrow i + 1$
13. **return** $\mathbf{Max} (Configs)$

Este algoritmo hace uso de las siguientes funciones:

1. Unir: Esta función combina dos listas.
2. OrdinaryFiltrar: Esta función ordena las configuraciones de forma ascendente con respecto al orden Influencia, (2) eliminar las configuraciones que no cumplen con las restricciones de velocidad máxima y presión mínima y (3) remplazar las configuraciones que desconecten nodos por configuraciones similares que no los desconectan y de no ser posible el cambio se elimina la configuración.
3. Max: Retorna la configuración con mayor valor de Influencia de la lista de configuraciones.
4. Podar: Esta función almacena cada nudo que se pode, separa las configuraciones que pertenezcan a una misma zona de influencia de las configuraciones que únicamente tienen valores similares de influencia y elimina las configuraciones similares de la lista.

Para realizar la eliminación de configuraciones si una configuración C_i es similar a una configuración C_{i+1} , significa que la influencia de C_{i+1} es menor o igual a la influencia de $(C_i)(1+\delta)$ entonces la configuración C_i es podada de la lista, donde δ es el factor que determina la zona de influencia y depende de ϵ . Para el caso de este artículo caso δ se define como:

$$\delta = \frac{\epsilon}{2(|V||P_v| + |H||P_h|)}$$

CASO DE ESTUDIO

El algoritmo se implementó en el software REDES desarrollado por el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados CIACUA de la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Se desarrolló el Módulo de Software para planeación de lavado unidireccional en REDES y para evaluar la funcionalidad del algoritmo se usó la Red R28; esta es una red de distribución teórica creada por el CIACUA. La red tiene 67 tuberías de PVC, 39 nudos, un embalse y una longitud total de 9750 m. Para este ejemplo se emplearon 12 válvulas, un hidrante, una rugosidad de 0.0015 mm y un coeficiente de pérdidas menores de 0 en todos los tubos. Se buscaba realizar el lavado de dos tuberías y se utilizaron tres aperturas de las válvulas: abierta, cerrada y abierta a la mitad.

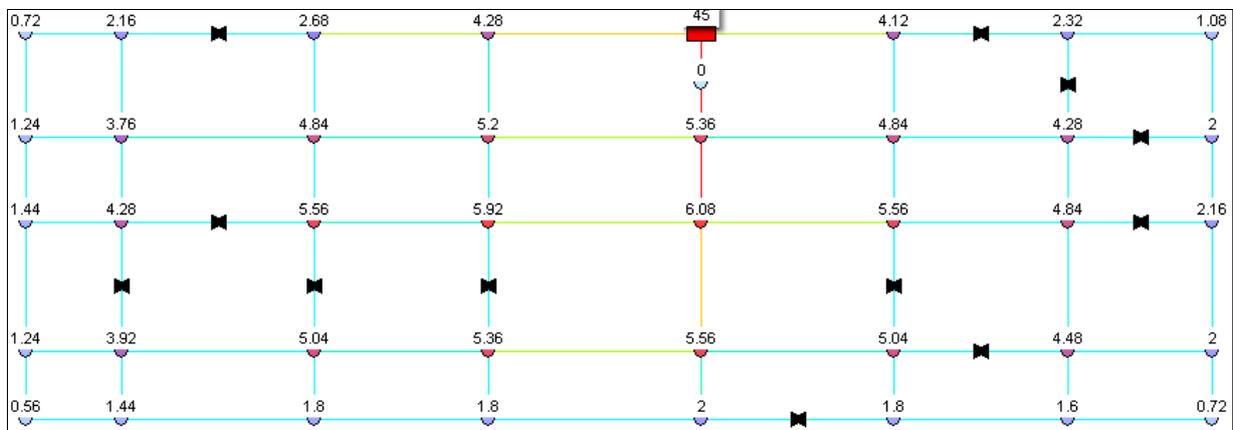


Figura 1. - RDAP R28. Un tanque con su línea de gradiente hidráulico (m), 39 nudos con su demanda de caudal (L/s), 12 válvulas y un hidrante.

A continuación se presentan las características de cada una de las tuberías del sistema (Tabla 1). Las características de localización espacial para cada nudo se muestran en la Tabla 2. Las tuberías a lavar son la 33 y la 37 con unas velocidades de 1m/s y 1.4 m/s respectivamente.

Tabla 1.- Características de las tuberías de la red R28.

ID Tubo	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Nudo Inicial	Nudo Final	ID Tubo	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Nudo Inicial	Nudo Final
1	80	50	2	1	35	150	50	34	35
2	150	50	3	2	36	120	50	35	36
3	100	50	4	3	37	100	50	36	37
4	120	50	5	4	38	150	50	37	38
5	100	50	6	5	39	80	50	38	39
6	120	50	6	7	40	150	50	30	39
7	100	50	7	8	41	200	50	21	29
8	150	50	8	9	42	220	50	20	21
9	80	50	9	10	43	180	50	11	20
10	200	50	15	6	44	100	50	1	10
11	120	50	15	14	45	200	50	10	11
12	100	50	14	13	46	180	50	29	30
13	150	50	13	12	47	100	50	2	9
14	80	50	12	11	48	150	50	31	38
15	180	100	16	15	49	200	50	9	12
16	120	75	16	17	50	180	50	28	31
17	100	50	17	18	51	180	75	12	19
18	150	50	18	19	52	200	75	22	28
19	80	50	19	20	53	220	100	19	22
20	220.51	150	40	16	54	100	50	3	8
21	60.93	200	40	41	55	150	50	32	37
22	100	200	24	23	56	200	50	8	13
23	150	150	23	22	57	180	50	27	32
24	80	75	22	21	58	180	75	13	18
25	200.56	100	40	25	59	200	100	23	27
26	120	50	25	26	60	220	100	18	23
27	100	50	26	27	61	100	50	4	7
28	150	50	27	28	62	150	50	33	36
29	80	50	28	29	63	200	75	7	14
30	180	75	25	34	64	180	50	26	33
31	120	50	34	33	65	180	75	14	17
32	100	50	33	32	66	200	75	24	26
33	150	50	32	31	67	220	100	17	24
34	80	50	31	30	68	60	200	41	24

Tabla 2.- Características de los nudos e hidrante de la red R28. Hidrante señalado (nudo 41).

ID Nudo	Demanda (lps)	X (m)	Y (m)	ID Nudo	Demanda (lps)	X (m)	Y (m)
1	0.56	0	0	21	2	700	0
2	1.24	0	80	22	5.56	700	80
3	1.44	0	230	23	6.08	700	230
4	1.24	0	330	24	5.36	700	330
5	0.72	0	450	25	4.12	900	450
6	2.16	100	450	26	4.84	900	330
7	3.76	100	330	27	5.56	900	230
8	4.28	100	230	28	5.04	900	80
9	3.92	100	80	29	1.8	900	0
10	1.44	100	0	30	1.6	1080	0
11	1.8	300	0	31	4.48	1080	80
12	5.04	300	80	32	4.84	1080	230
13	5.56	300	230	33	4.28	1080	330
14	4.84	300	330	34	2.32	1080	450
15	2.68	300	450	35	1.08	1230	450
16	4.28	480	450	36	2	1230	330
17	5.2	480	330	37	2.16	1230	230
18	5.92	480	230	38	2	1230	80
19	5.36	480	80	39	0.72	1230	0
20	1.8	480	0	41	0	700.4	393

En la tabla anterior el nudo 41 representa el hidrante que será utilizado para el lavado. Se plantearon dos escenarios, uno con un parámetro de aproximación ϵ de 99.99% y el otro de 1%. Esto a fin de ver la importancia de este parámetro en la obtención de la solución. Este parámetro define la calidad de la solución pero a la vez aumenta el número de escenarios a evaluar, siendo 1% el parámetro de aproximación con mejor calidad pero con mayor número de escenarios a evaluar.

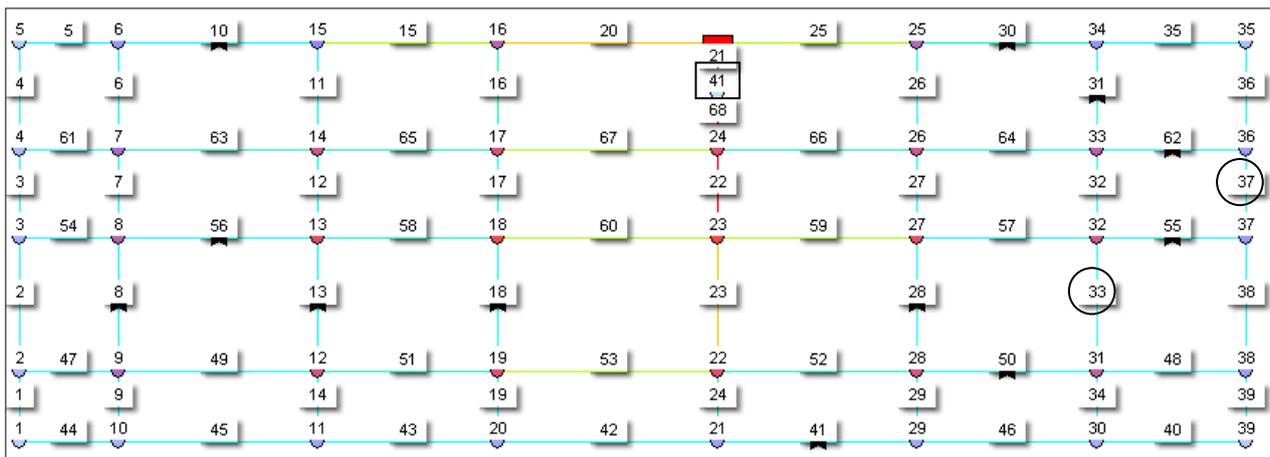


Figura 2. – RDAP R28. Se muestran los ID de cada nudo y tubería. El hidrante está ubicado en el nudo 41 y se indica en el rectángulo. Las tuberías a lavar son la 33 y la 37 y se señalan con círculos.

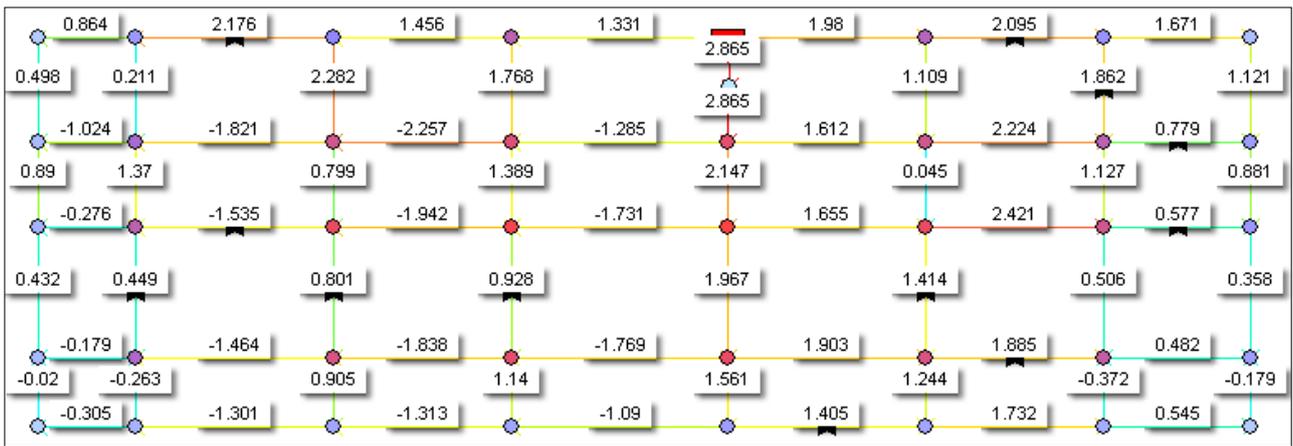


Figura 3. -RDAP R28. Velocidades iniciales (m/s).

Resultados con 99.99%

Usando el parámetro de aproximación con un valor del 99.99% se encontró una solución evaluando 260 escenarios con un valor de influencia de 4.175. Las velocidades obtenidas en los tuberías a lavar fueron de 1.59 m/s para la tubería 33 y de 1.58 m/s para la tubería 37. El procedimiento de lavado consiste en abrir la válvula 30 a la mitad, cerrar las válvulas 55, 28, 50 y 10. Y esto genera cambios de velocidad en las tuberías 1, 27, 33, 34, 37, 39, 44, 47, 54, 6, y 62.

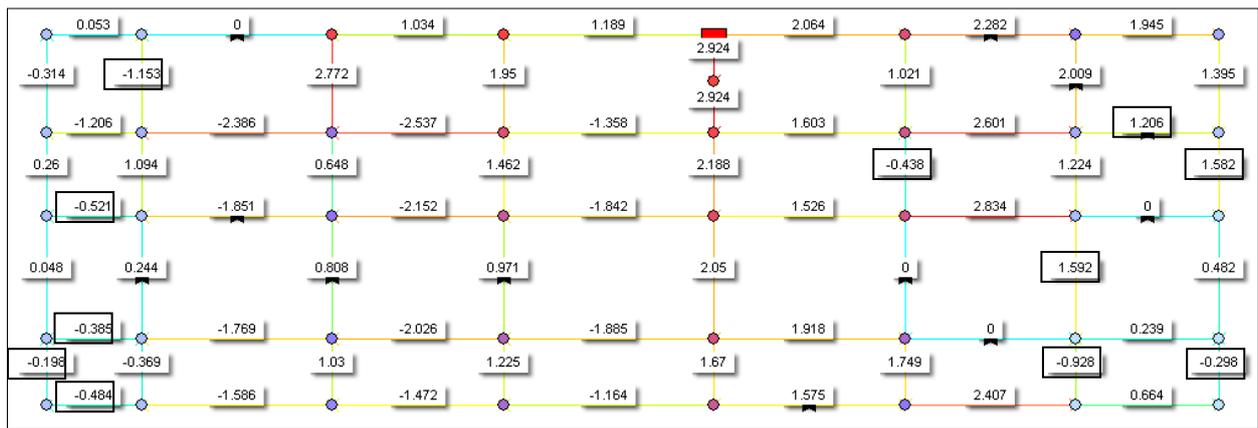


Figura 4. -RDAP R28. Velocidades obtenidas con un parámetro de aproximación de 99.99% (m/s).

Resultados con 1%

Usando el parámetro de aproximación con un valor del 1% se encontró una solución evaluando 10664 escenarios con un valor de influencia de 4.221.

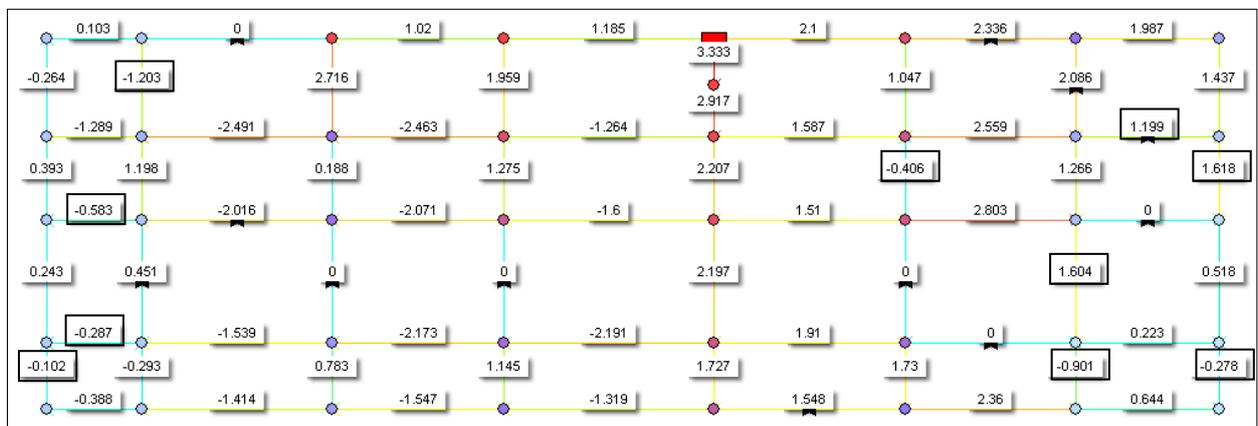


Figura 5. -RDAP R28. Velocidades obtenidas con un parámetro de aproximación de 1% (m/s).

Las velocidades obtenidas en las tuberías a lavar fueron de 1.60 m/s para la tubería 33 y de 1.62 m/s para la tubería 37. El procedimiento de lavado consiste en cerrar las válvulas 55, 18, 13, 28, 50 y 10 y abrir el hidrante 41. Esto genera cambios de velocidad en las tuberías 1, 27, 33, 34, 37, 39, 44, 47, 54, 6, y 62.

Comparación de resultados

El escenario de 1% se obtuvo un mejor valor de influencia pero el número de escenarios evaluados aumentó de 260 a 10664. Por esta razón aunque se tiene un mejor escenario de solución con la aproximación del 1% el aumento de los escenarios a evaluar puede ser excesivo y además con la aproximación de 99.99% se llega también a una solución factible y similar. Por lo tanto, con los resultados se comprobó que el parámetro de aproximación define la calidad de la solución.

CONCLUSIONES

Se determinó la dificultad del problema lo que permite ahorros en tiempo, ya que esto permite identificar que tipos de algoritmos dan solución al problema planteado.

Se probó que UDFP es un problema NP-Completo y se propuso un algoritmo de aproximación de orden polinomial que brinda garantías sobre la solución que calcula con respecto a la óptima.

Se desarrolló de manera óptima un algoritmo que determinará si es posible encontrar un plan de lavado para una RDAP.

Se desarrolló el módulo de planeación de lavado en el software REDES lo que permite evaluar la funcionalidad del algoritmo para diferentes casos de estudio.

Es posible automatizar el planeado de lavado unidireccional para así evitar las decisiones subjetivas que se toman cuando el plan se realiza con la necesidad de la opinión de un experto o alguien que conozca la red.

REFERENCIAS

- Ahuja, R. K., Magnanti, T.L. and Orlin, J.B.** (1993). "Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications". *1st edition. Prentice Hall.*
- Álvarez, L.M.** (2009). "Propuesta de una metodología para el diseño optimizado de lavados hidráulicos unidireccionales en redes de distribución de agua potable". *Msc.Tesis. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia*
- Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R.L. and Stein, C.** (2009) *Third Edition. Introduction to Algorithms. The MIT Press.*
- Friedman, M.** (2002). "Distribution system. Flushing program". *Journal AWWA. vol. 94, num. 7, pp. 48-56.*
- Gómez, D.M.** (2010). "Técnicas para el Lavado de Redes de Distribución de Agua Potable". *Tesis de grados. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia*
- Garey, M.R. and Johnson, D.S.** (1979). "Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness". *W.H. Freeman.*
- Rothstein, E.G.** (2011). "Planeación de Lavado Unidireccional en Redes de Distribución de Agua: Una Aproximación". *Msc.Tesis. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia*
- Saldarriaga, J.G.** (2002). "Hidráulica de tuberías. Edición especial". *McGraw-Hill. ISBN: 9586008312*
- Todini, E. and Pilati, S.** (1987). "A gradient method for the analysis of pipe networks, International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution", *Leicester Polytechnic, UK.*