



SIMPLIFICACION DE MODELOS DE REDES DE DISTRIBUCION DE AGUA: UNA APROXIMACION DESDE LA TEORIA DE GRAFOS.

Cristian Alexander Germán Rojas¹, Pedro L. Iglesias Rey¹, F. Javier Martínez Solano¹

¹IDepartamento de Ingeniería Hidráulica, Universitat Politècnica de València (España)

¹*piglesia@upv.es*

RESUMEN

Los modelos de redes de distribución de agua se han convertido en una herramienta esencial para la gestión y explotación eficaz de las redes de distribución de agua. La tecnología actual ha permitido generar modelos a detalle de redes complejas, estas requieren el uso frecuente de herramientas de optimización, las cuales implican numerosos análisis del comportamiento de la red [1]. La simplificación presenta varias ventajas, entre ellas la mejora del tiempo computacional y facilidad para la toma de decisiones por parte de los gestores de la red. En este trabajo se presenta una metodología basada en 6 algoritmos de simplificación, que permiten lograr reducciones de hasta el 80% de los elementos de la red para el caso de estudio, manteniendo un buen índice de Nash como elemento de validación y archivos de curvas de consigna para representar los elementos simplificados.

Palabras clave: simplificación, modelos, redes de distribución de agua

1. INTRODUCCIÓN

La modelación matemática se ha establecido como una herramienta indispensable para la gestión y operación efectivas de las redes de distribución de agua. La tecnología actual ha permitido la generación de modelos detallados de redes complejas con centenares o miles de elementos, a partir de herramientas como los Sistemas de Información Geográfica, donde se representan todos los elementos de la red [2,3]. Estos modelos se utilizan para planificar, operar y regular el funcionamiento de las redes, y para ello se requiere con frecuencia el uso de herramientas de optimización que involucran numerosos y reiterados análisis del comportamiento de la red. Es en este contexto donde la simplificación de las redes se está volviendo sumamente efectiva.

La simplificación de los modelos de redes de distribución de agua tiene varias ventajas. Simplifica el modelo representándolo solo con los elementos seleccionados, lo que reduce el coste computacional de los modelos hidráulicos y acelera los algoritmos, pero para representar la realidad. Es necesario obtener una relación explícita y única entre un punto de la red simplificada y la red original, esto es simbolizado a través de curvas de consigna de los elementos simplificados. La curva de consigna puede definirse como la altura o presión mínima necesaria en un nodo de suministro para garantizar una presión residual suficiente en el nodo de peor consumo de la red. [4]

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Una línea emergente en la optimización de redes de distribución de agua es la reducción de los espacios de búsqueda. Los problemas con espacios de búsqueda enormes con frecuencia presentan dificultades en la obtención de soluciones. Al mismo tiempo, estos procesos de optimización suelen caer en mínimos locales que pueden estar alejados de los mínimos globales del proceso. Sin duda, una herramienta sumamente eficaz es reducir tanto el número de variables de decisión como el tiempo que tarda el modelo matemático en evaluar cada una de las soluciones consideradas. Es por ello por lo que la simplificación al máximo de los modelos de redes de abastecimiento se ha convertido en un fenómeno creciente en el ámbito de la teoría de grafos.

En la literatura existen numerosos métodos de simplificación en redes de distribución de agua, Algunos de ellos plantean simplificaciones sencillas, como son la eliminación de tuberías paralelas, nodos terminales y nodos intermedios [5]. (Otras utilizan conceptos más sofisticados como la resiliencia de la red de distribución [6]. Sin embargo, cuando se requiere una simplificación grande de la red, es necesario la utilización de herramientas más potentes como la teoría de grafos.

Este trabajo presenta una metodología de simplificación de modelos de redes de distribución de agua basada en la teoría de grafos que pueda ser utilizada en cualquier red. La metodología incluye desde las simplificaciones más sencillas como la eliminación de tuberías y nudos innecesarios [4] hasta las más complejas como la sectorización y simplificación de bloques con múltiples entradas y salidas. En todos los casos la simplificación debe garantizar la equivalencia hidráulica entre el modelo simplificado y la red original.

Otro objetivo importante de este trabajo es evaluar el impacto de la simplificación de la red en la gestión y operación de la red de distribución de agua. Para ello, se analizarán diferentes escenarios de operación de la red, con diferentes elementos de control y con diferente porcentaje de error admisible.

Finalmente, se pretende que esta metodología sea de utilidad práctica para los gestores y operadores de redes de distribución de agua, al proporcionarles herramientas más eficaces y precisas para el análisis y la gestión de las redes. Por lo tanto, se espera que este trabajo contribuya significativamente al desarrollo de mejores prácticas en la gestión de los recursos hídricos y a la mejora de la eficiencia y eficacia en la gestión de las redes de distribución de agua.

2. METODOLOGÍA

El método presentado en este trabajo utiliza como base el modelo EPANET [7]. La validez de este modelo es de gran importancia, ya que los algoritmos realizan la validación de la simplificación basándose en comparativas de análisis hidráulicos entre la red original y la simplificada.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Para la simplificación se deben definir elementos de control, tuberías y nudos ya que son los elementos en los que se basará la validación del modelo para obtener un modelo simplificado que represente el original. Estos elementos no serán tocados por ninguno de los algoritmos definidos a continuación y servirán como delimitadores en el algoritmo de bloques con múltiples entradas y salidas.

La definición de los parámetros y elementos de control en el proceso de simplificación se basan en las características de la red, en algunos análisis previos y en el objetivo de la simplificación. Asimismo, es necesario definir puntos y líneas de control en las que se verificará que las variables utilizadas como control permitan validar las diferentes simplificaciones del modelo.

La teoría de grafos se emplea en el análisis y optimización de las redes de distribución de agua. Ya existen previas metodologías desarrolladas basándose en esta para la identificación de elementos críticos de la red, ayudando a priorizar las actividades de mantenimiento y rehabilitación. Además, se ha utilizado para el desarrollo de algoritmos de sectorización.

La base de la metodología es la teoría de grafos, con la que se procede a la realización de un árbol generador basándose en la mayor capacidad de transporte hidráulico. A partir de este árbol generador se encuentran las tuberías que servirán para la sectorización de la red y su posterior simplificación. El análisis topológico de los grafos y subgrafos definidos a partir del modelo original de la red y de los diferentes nodos y líneas de control permite definir las potenciales simplificaciones a realizar en la red.

El objetivo de los algoritmos desarrollados es ejecutar la simplificación de forma iterativa, comparar en cada etapa el efecto hidráulico que ha tenido la simplificación en los elementos de control y evaluar si se encuentra dentro de los parámetros admisibles definidos por el usuario. En caso contrario, la simplificación propuesta es descartada y se vuelve a la red original donde se procede a continuar con el siguiente elemento en la lista del algoritmo que se esté implementando. Como resultado, la equivalencia hidráulica está asegurada, y el proceso iterativo prosigue hasta que no se encuentren más elementos que puedan ser reducidos.

De forma general, una simplificación sencilla de la red conduce a la pérdida de detalles importantes. Así, los cambios en las características de las tuberías pueden afectar significativamente la velocidad del flujo y presiones aguas abajo de los elementos simplificados. Asimismo, algunos detalles de los nudos como sus demandas o patrones pueden verse afectados sin una simplificación cuidadosa. Para superar esta limitación, el método se asegura de para cada simplificación asignar las demandas correspondientes a los nudos base y el cálculo de las tuberías equivalentes.

2.1 [Algoritmos de simplificación:]

Simplificación de tuberías paralelas:

La técnica de reducción empleada es la unión de tuberías paralelas. La simplificación de tuberías paralelas consiste en un proceso de unión o fusión de dos o más tuberías dispuestas de forma paralela. La unión de las tuberías consiste en reemplazarlas por una sola tubería, tal como se

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

muestra en la Figura 1. Para evitar alteraciones en el resto del sistema, se realiza un ajuste de los parámetros físicos que determinan su comportamiento, obteniendo así una tubería equivalente en términos hidráulicos.

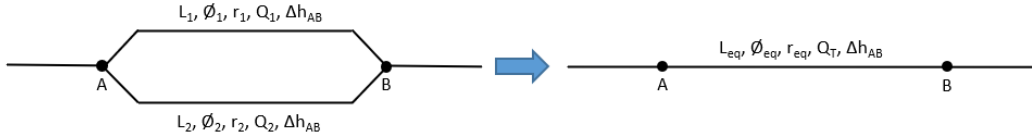


Figura 1. Simplificación de tuberías paralelas.

Los candidatos deben cumplir ciertos criterios topológicos e Hidráulicos, y solo se tomarán en cuenta aquellos que cumplan con ambos elementos, ser propiamente tuberías, es decir, no pueden ser bombas o ningún tipo de válvulas, no son elementos de control predefinidos por el Usuario.

El principal desafío encontrado al realizar esta unión es lograr representar en un solo elemento la Pérdida de carga generada por las tuberías. Para esto se procede a calcular la longitud equivalente como el promedio de las longitudes de las tuberías originales, mientras que la rugosidad viene dada por la ponderación de las rugosidades basándonos en la longitud de las tuberías.

A su vez, la resistencia viene dada por la fórmula de Hazen Williams y al tratarse de una simulación dinámica donde tendremos diferentes caudales, se deja en función de este, como podemos ver en la siguiente ecuación.

$$R = \frac{10.61}{C^{1.85}} * L$$

Donde R es la resistencia de la tubería, C es el coeficiente de Hazen-Williams, L es la longitud, D es el Diámetro de la tubería. Una vez obtenida la resistencia generada por cada una de las tuberías a simplificar se procede a encontrar la resistencia que debe generar la nueva tubería con la fórmula.

$$Req = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{(R1)}} + \frac{1}{\sqrt{(R2)}}\right)^2}$$

Donde Req es la resistencia equivalente para la nueva tubería, R1 y R2 son las resistencias generadas por las tuberías paralelas. Una vez obtenida la resistencia equivalente de la nueva tubería, se procede al cálculo de diámetro equivalente.

$$Deq = \left(10.61 * \frac{Leq}{Req}\right)^{\frac{1}{4.87}}$$

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Donde Deq es el Diámetro equivalente para la nueva tubería, Leq es la longitud equivalente de la nueva tubería, Ceq es el Coeficiente de Hazen Williams obtenido para la nueva tubería y Req es la resistencia que debe generar la nueva tubería.

Algoritmo de simplificación de nudos terminales:

La simplificación de nudos terminales es una técnica de análisis de redes de distribución de agua basada en la teoría de grafos, la cual consiste en la eliminación de los nudos que tienen un grado de conectividad igual a uno. Para ello, se determina el nudo base correspondiente y se procede a la reasignación de la demanda y al cálculo del posible patrón de consumo equivalente, en caso de ser necesario.

Esta técnica se basa en la observación de que los nudos con grado uno no afecta significativamente el comportamiento hidráulico de la red y pueden ser simplificados sin afectar la precisión del análisis hidráulico. Para calcular el patrón de consumo equivalente se puede utilizar la siguiente ecuación.

$$C_{NB-S} = \frac{DB_{NB-O} \times C_{NB-O} + DB_{NT-O} \times C_{NT-O}}{DB_{NB-S}}$$

Donde C es el coeficiente de demanda, DB es la demanda base y los subíndices NB , NT , O y S hacen referencia al nudo base, nudo terminal, modelo original y modelo simplificado, respectivamente.

Algoritmo de simplificación de nudos cercanos:

El algoritmo de simplificación de nudos cercanos reduce la complejidad de la red de tuberías, al fusionar dos o más nudos cercanos y eliminar las tuberías que los conectan, para la reducción de nudos cercanos, el parámetro de distancia queda a definición del usuario, quien determina la distancia topológica y diferencia de cotas que debe cumplirse para que se consideren cercanos. Se espera que los nodos cercanos cuenten con características muy similares, especialmente en las alturas piezométricas, además de que las tuberías que los conecten sean de corta longitud.

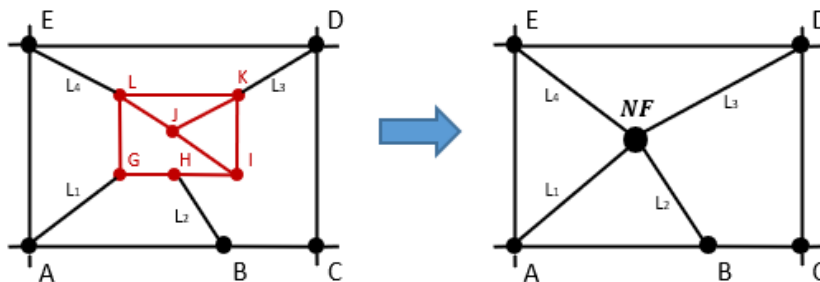


Figura 2 simplificación de nudos cercanos.

El proceso consiste en la unión de dos o más nudos a partir del reemplazo por un único nudo y la eliminación de las tuberías que los conectan. Para mantener la mejor representación de lo

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

simplificado se realiza un ajuste en el nudo resultante de la fusión, considerando las demandas y alturas piezométricas de consigna de los nudos eliminados.

Algoritmo de eliminación de nudos intermedios.

La simplificación de nudos intermedios es otra técnica de análisis hidráulico de redes de distribución de agua. Esta técnica consiste en unir dos tuberías en serie mediante la eliminación del nudo intermedio, siempre y cuando dicho nudo tenga un índice de conectividad igual a dos, es decir, que no esté conectado a otras tuberías y además cumpla con las características de: no ser un elemento fuente. Las líneas conectadas a este nudo son tuberías propiamente dichas, tanto el nudo como las tuberías no deben ser elementos de control.

Para lograr la mejor simplificación posible, se deben definir tres limitantes por parte del usuario: la demanda base máxima admisible para simplificar un nudo intermedio, la diferencia máxima admisible de diámetros entre las tuberías anterior y posterior, y la diferencia máxima de rugosidad entre las tuberías anterior y posterior.

Una vez se han identificado los candidatos para la simplificación, se deben calcular los parámetros físicos que debe tener la nueva tubería para representar la misma pérdida de carga que el modelo original. Para ello, se propone la longitud equivalente como la suma algebraica de ambas tuberías, la rugosidad equivalente como la media ponderada de ambas rugosidades en función de la longitud de las tuberías, y el diámetro equivalente como el que cumpla las condiciones impuestas por los limitantes definidos previamente.



Figure 3 simplificación de nudos intermedios.

Algoritmo de simplificación de bloques terminales:

La simplificación de bloques terminales es una técnica de análisis hidráulico de redes de distribución de agua que se aplica cuando un bloque se conecta a la red principal mediante una única tubería. Al eliminar dicha tubería, la red se dividiría en dos componentes, lo que no es deseable para el análisis hidráulico.

Para abordar esta situación, se recurre a la teoría de grafos y se busca un árbol generador de la red que contenga todos los vértices del grafo. Al eliminar la tubería que conecta el bloque terminal a la red principal, se busca realizar la operación sin generar cambios significativos en las características hidráulicas del resto de la red.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Por lo tanto, es necesario reasignar la demanda asociada a los nudos eliminados y calcular el patrón de consumo equivalente en el nudo base, en el cual se relocaliza la demanda. También se debe realizar un análisis de presiones para determinar la curva de consigna de alturas piezométricas necesaria en el nudo base. Estos ajustes son similares a los propuestos para los ramales terminales.



Figura 4 simplificación de bloques terminales.

Algoritmo de simplificación de bloques con múltiples entradas o salidas.

Al igual que el anterior, el algoritmo de simplificación de bloques con N entradas surge de la estructura que presenta la red en los modelos obtenidos después de aplicar las técnicas de reducción anteriores sucesivamente. Si bien ya se planteó un algoritmo para la simplificación de bloques terminales, es decir, aquellos que se conectan a la red principal por un solo nudo, aún quedan bloques o mallas sin simplificar. Por este motivo, este algoritmo se basa en los bloques que se unen a la red principal por dos o más nudos.

En este algoritmo se utiliza como delimitantes los elementos de control, intentando encontrar bloques que se encuentren entre 2 líneas de control, en los cuales no se encuentre ningún elemento tipo fuente, otro elemento de control ni bombas o válvulas de cualquier tipo.

Para esto se utiliza el árbol generador de la red ya simplificada y se procede a recorrer las aristas de este marcando lo recorrido como parte del sector actual hasta encontrarse con algún elemento de control, momento donde el algoritmo se regresa por los nodos ya visitados y comprueba que estos no tengan elementos sin visitar, en caso de tenerlos los visita hasta encontrar otro elemento de control en esa dirección, repitiendo el proceso hasta que los vértices que se encuentren dentro de este sector estén todos visitados.

Una vez determinado en el árbol generador las tuberías que delimitan este bloque, es fácil encontrar todas las demás entradas y/o salidas que este posea, ya que cualquier línea que tenga un nudo que se encuentre en este sector y otro que se encuentre en algún otro sector, es un elemento de corte para este sector.

Luego de haber obtenido el sector se puede recorrer y obtener la lista de todos los nudos encontrados en este, para proceder a la reasignación de la demanda a un nuevo nudo creado para representar las demandas de este sector, con su respectivo nuevo patrón de consumo creado para representar en todos los instantes de tiempo, la demanda de los nodos eliminados.

La problemática encontrada al realizar esta simplificación fue encontrar la forma de representar las pérdidas de carga generadas por las tuberías eliminadas dentro del sector. para esto se generaron n número de válvulas correspondientes al m número de líneas de entrada/salida al

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

sector, para solventar esta problemática y encontrar la solución de valores para coeficientes de pérdida de carga óptimo para cada una de las válvulas generadas, se procedió a utilizar el algoritmo de optimización de Hooke & Jeeves, el cual consiste en un proceso de búsqueda directa de soluciones óptimas, mediante la combinación de movimientos exploratorios en varias dimensiones.

Para utilizar este algoritmo se propuso como función objetivo minimizar el Error cuadrático medio del modelo simplificado con el modelo original, así minimizando la diferencia de presiones y caudal en cada uno de los elementos del sistema.

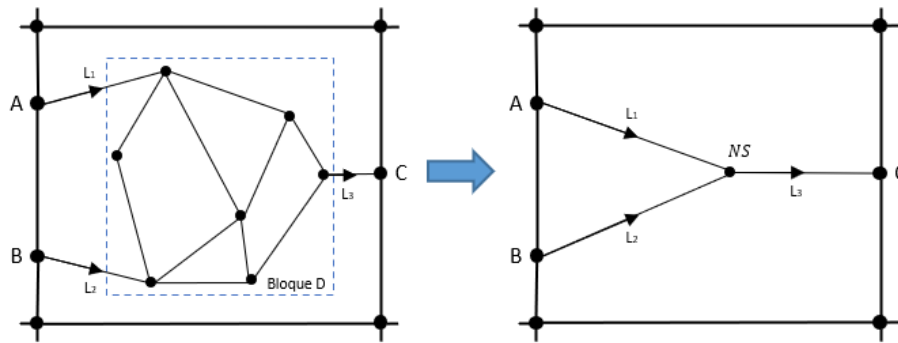


Figure 5 simplificación de bloque con múltiples entradas y salidas.

Validación de los algoritmos.

Después de cada iteración en cada uno de los algoritmos, se procede a calcular el Error de raíz cuadrada media (RMSE) de la red, utilizando para ello la comparación de los valores de presión y caudal en los puntos de control de la red original contra los mismos elementos en la red simplificada.

Si el valor de RMSE se encuentra por debajo del umbral delimitado por el usuario, se procede a validar la simplificación y continuar con el siguiente elemento de la lista del algoritmo en el que nos encontremos, en caso contrario, se marca esta simplificación como nula, volviendo a la última red válida obtenida y procediendo con el siguiente elemento en la lista de simplificación.

3. RESULTADOS

La metodología desarrollada en este trabajo se plantea como práctica y adaptable a las necesidades de simplificación y a las características de la red. Con el fin de comprobar estos atributos y observar las limitaciones que se puedan presentar se aplican todos los algoritmos propuestos a un caso de estudio complejo. La aplicación se realizará de manera sucesiva e iterativamente, hasta lograr el mayor grado de simplificación posible manteniendo el comportamiento hidráulico del modelo original.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Table 1 parámetros considerados en la aplicación al caso de estudio.

Parámetros		Valor
Simplificación	Diferencia de diámetro admisible	50%
	Diferencia de rugosidad admisible	100%
	Demanda base máxima admisible	4 lps
	Diámetro troncal	260 mm
	Presión mínima de consigna	20 m
	Longitud máxima admisible	150 m
	Diferencia de cota máxima admisible	1.5 m
Validación	Índice de Nash-Sutcliffe mínimo para caudales	0.80
	Índice de Nash-Sutcliffe mínimo para presiones	0.80
	Diferencia de caudal máxima admisible	10%
	Diferencia de presión máxima admisible	10%

En cuanto a la selección de los elementos de control, los cuales se definen como pares de nudos y líneas, para la aplicación a este caso de estudio se considera un total de 20. Estos elementos se encuentran distribuidos a lo largo de red y ubicados en la estructura principal, es decir, tuberías de mayor diámetro. Esta localización se adopta con el fin de mantener esa parte de la estructura en el modelo reducido. Para este caso de estudio, los pares de nudos y líneas de control están compuestos de un nudo y la línea adyacente que se encuentra aguas arriba del mismo. En la red de la figura 5 se muestran la ubicación de los nudos de control considerados.

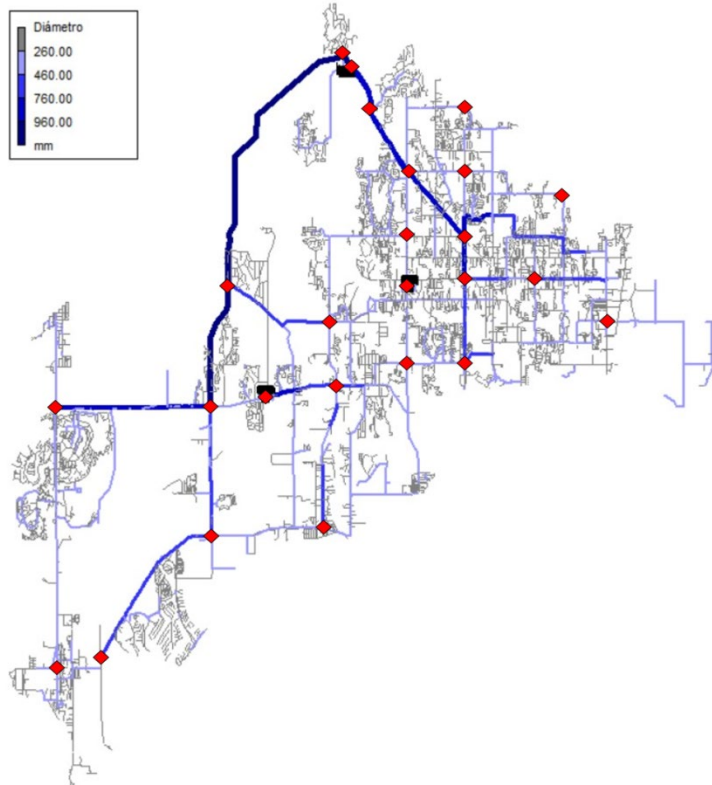


Figura 6 ubicación de los elementos de control

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Los resultados de la simplificación se pueden apreciar tanto en el aspecto topológico como en el comportamiento hidráulico de la red analizada. Con esto, la topología de la red original y la red simplificada de este caso de estudio se muestra en la figura 6.

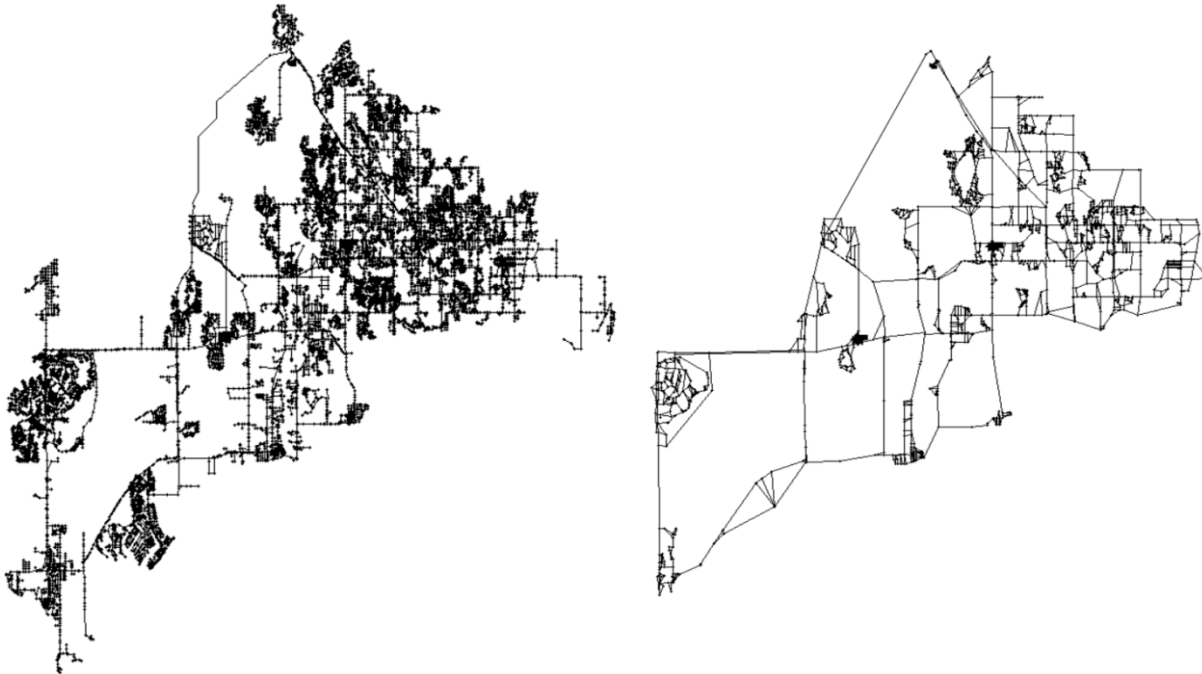


Figura 7 comparación topológica entre la red original y la red simplificada.

Tabla 2. Comparativa entre la red original y red simplificada.

Característica	Red Original	Red Simplificada	Eliminación
Nº de nudos	12498 ud	1746 ud	86.0%
Nº de tuberías	14799 ud	2627 ud	82.2%
Ratio nudos/tuberías	84.5 %	66.5 %	21.3%
Nº de embalses	2 ud	2 ud	0.0%
Nº de depósitos	2 ud	2 ud	0.0%
Nº de bombas	3 ud	3 ud	0.0%
Nº de válvulas	4 ud	4 ud	0.0%
Longitud total de tuberías	1843 km	825 km	55.2%
Elevación media de nudos	15.3 m	16.6 m	-8.5%

4. CONCLUSIONES

La necesidad de obtener modelos reducidos a través de la simplificación es una práctica que ha estado presente a lo largo de la historia de los modelos matemáticos de RDA. Aun cuando los avances tecnológicos tiendan a disminuir en cierta medida esta necesidad, esta práctica seguirá vigente en el futuro. Esto se debe al crecimiento constante de información base disponible para la

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

construcción de estos modelos, así como para el entendimiento del funcionamiento global del sistema, para la aplicación de algoritmos de optimización, entre otros trabajos, en los cuales contar con modelos reducidos implique una disminución de costes computacionales.

Con respecto a los métodos de simplificación desarrollados, se destaca la combinación de conceptos Hidráulicos con los de la teoría de grafos para la identificación automática de cada uno de los candidatos en cada algoritmo de simplificación.

El procedimiento definido mantiene la demanda de la red. Asimismo, el comportamiento de cada nudo queda representado por una curva de consigna que recoge el valor de la presión requerida para garantizar que la red simplificada en el mismo se comporte igual que la red original, proporcionando así además de facilidad de gestión de la red, precisión en los elementos no existentes en el modelo simplificado.

Referencias

- [1] Giustolisi, O., Savić, D.A., & Kapelan, Z. (2011). ANALYSIS OF SIMPLIFICATION ERRORS FOR WATER DISTRIBUTION MODELS.
- [2] A. Ostfeld, "Water Distribution Networks," Springer, Berlin, Heidelberg, 2015, pp. 101–124.
- [3] L. Cesario, Modeling, analysis and design of water distribution systems. Denver: American Water Works Association, 1995.
- [4] F. J. Martínez-Solano et al., "Using the Set Point Concept to Allow Water Distribution System Skeletonization Preserving Water Quality Constraints," *Procedia Eng.*, vol. 89, pp. 213–219, Jan. 2014.
- [5] T. Walski et al., "Advanced Water Distribution Modeling and Management," *Civ. Environ. Eng. Eng. Mech. Fac. Publ.*, Jan. 2003.
- [6] J. G. Saldarriaga et al., "Water Distribution Network Skeletonization Using the Resilience Concept," in *Proceedings of the 10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference, WDSA 2008, 2009*, pp. 852–864.
- [7] Rossman, L. A. (2001). *Epanet 2 manual de usuario*. US Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.