



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Desarrollo de métodos automáticos de simplificación de redes de distribución de agua mediante el uso de la teoría de grafos.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: German Rojas, Cristian Alexander

Tutor/a: Iglesias Rey, Pedro Luis

Cotutor/a: Martínez Solano, Francisco Javier

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

Trabajo Fin de Máster

DESARROLLO DE MÉTODOS AUTOMÁTICOS DE SIMPLIFICACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA MEDIANTE EL USO DE TEORÍA DE GRAFOS

Intensificación: HIDRAÚLICA URBANA

Autor:

*CRISTIAN ALEXANDER GERMÁN
ROJAS*

Tutor:

DR. PEDRO LUIS IGLESIAS REY

Cotutor/es:

*DR. FRANCISCO JAVIER MARTÍNEZ
SOLANO*

SEPTIEMBRE, 2023



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Datos del proyecto

Título del TFM en español: Desarrollo de métodos automáticos de simplificación de redes de distribución de agua mediante el uso de teoría de grafos.

Título del TFM en inglés: Development of automatic simplification methods for water distribution networks using graph theory.

Título del TFM en Valenciano: Desenvolupament de mètodes automàtics de simplificació de xarxes de distribució d'aigua mitjançant l'ús de teoria de grafes.

Alumno: Cristian Alexander German Rojas.

Tutor: DR. Pedro Luis Iglesias Rey.

Cotutor/es: DR. Francisco Javier Martínez Solano.

Fecha de Lectura: septiembre 2023

Resumen

En español (máximo 5000 caracteres)

La modelización mediante modelos matemáticos es una práctica común en el análisis de sistemas diversos, buscando representar con precisión el comportamiento real de sistemas físicos complejos. En el ámbito de la hidráulica, esta práctica cobra especial relevancia en las redes de distribución de agua (RDA), fundamentales para abastecer agua en múltiples contextos,

desde hogares hasta usos industriales y agrícolas. La efectiva modelización de estas redes es esencial para optimizar su funcionamiento y reducir costos operativos.

La complejidad intrínseca de las RDA ha impulsado el desarrollo de software capaz de generar modelos matemáticos que reflejen su comportamiento. Estos modelos varían en detalle, desde exhaustivos que capturan todos los aspectos de la red hasta simplificados que retienen lo esencial. La elección del enfoque depende de los objetivos de análisis y la capacidad computacional disponible.

En este contexto, surge la necesidad de simplificar las RDA de manera efectiva y práctica, logrando un equilibrio entre precisión y eficiencia computacional. Los modelos simplificados son especialmente útiles para optimización, planificación estratégica y operaciones en tiempo real, como monitoreo de calidad del agua y mantenimiento de la red. La simplificación, aunque no trivial, debe considerar la topología y complejidad de la red.

Este trabajo se concentra en desarrollar una metodología de simplificación automática de RDA basada en algoritmos simples y que se ajusten a los parámetros que requiere el usuario. Se proponen seis algoritmos independientes que abordan diferentes aspectos de la simplificación, desde la reducción de elementos por separado, como pueden ser tuberías paralelas, nudos terminales o tuberías en serie hasta conjuntos de elementos como la simplificación de bloques terminales, bloques con múltiples entradas/salidas y la simplificación de nudos cercanos.

Un enfoque novedoso es la inclusión de conceptos de teoría de grafos para identificar automáticamente estructuras complejas en la red, permitiendo simplificaciones más avanzadas y automatizadas. Para validar y evaluar los algoritmos propuestos, se aplican a diversos casos de estudio mediante una herramienta informática específicamente diseñada. Los resultados obtenidos demuestran la eficacia de los algoritmos en la simplificación de RDA, manteniendo la precisión hidráulica y permitiendo un análisis más eficiente y práctico. En resumen, este trabajo presenta una metodología innovadora para simplificar redes de distribución de agua, con potencial para optimizar su operación y contribuir al desarrollo sostenible de los sistemas de abastecimiento de agua.

En valenciano (máximo 5000 caracteres): La modelització mitjançant models matemàtics és una pràctica comuna en l'anàlisi de sistemes diversos, buscant representar amb precisió el comportament real de sistemes físics complexos. En l'àmbit de la hidràulica, aquesta pràctica cobra especial rellevància en les xarxes de distribució d'aigua (RDA), fonamentals per a proveir aigua en múltiples contextos, des de llars fins a usos industrials i agrícoles. L'efectiva modelització d'aquestes xarxes és essencial per a optimitzar el seu funcionament i reduir costos operatius.

La complexitat intrínseca de les RDA ha impulsat el desenvolupament de programari capaç de generar models matemàtics que reflectisquen el seu comportament. Aquests models varien detalladament, des d'exhaustius que capturen tots els aspectes de la xarxa fins simplificats que retenen l'essencial. L'elecció de l'enfocament depén dels objectius d'anàlisi i la capacitat computacional disponible.

En aquest context, sorgeix la necessitat de simplificar les RDA de manera efectiva i pràctica, aconseguint un equilibri entre precisió i eficiència computacional. Els models simplificats són especialment útils per a optimització, planificació estratègica i operacions en temps real, com a monitoratge de qualitat de l'aigua i manteniment de la xarxa. La simplificació, encara que no trivial, ha de considerar la topologia i complexitat de la xarxa. Aquest treball es concentra a desenvolupar una metodologia de simplificació automàtica de RDA basada en algorismes simples i que s'ajusten als paràmetres que requereix l'usuari. Es proposen sis algorismes independents que aborden diferents aspectes de la simplificació, des de la reducció d'elements per separat, com poden ser canonades paral·leles, nusos terminals o canonades en sèrie fins a conjunts d'elements com la simplificació de blocs terminals, blocs amb múltiples entrades/eixides i la simplificació de nusos pròxims. Un enfocament nou és la inclusió de conceptes de teoria de grafs per a identificar automàticament estructures complexes en la xarxa, permetent simplificacions més avançades i automatitzades. Per a validar i avaluar els algorismes proposats, s'apliquen a diversos casos d'estudi mitjançant una eina informàtica específicament dissenyada. Els resultats obtinguts demostren l'eficàcia dels algorismes en la simplificació de RDA, mantenint la precisió hidràulica i permetent una anàlisi més eficient i pràctic. En resum, aquest treball presenta una metodologia innovadora per a simplificar xarxes de distribució d'aigua, amb potencial per a

optimitzar la seua operació i contribuir al desenvolupament sostenible dels sistemes de proveïment d'aigua.

En inglés (máximo 5000 caracteres)

The utilization of mathematical models is a common practice in analyzing diverse systems, aiming to accurately represent the real behavior of complex physical systems. In the realm of hydraulics, this practice becomes particularly relevant in water distribution networks (WDNs), which are crucial for supplying water in various contexts, from households to industrial and agricultural uses. Effectively modeling these networks is essential for optimizing their performance and reducing operational costs.

The inherent complexity of WDNs has led to the development of software capable of generating mathematical models that reflect their behavior. These models vary in detail, from exhaustive ones that capture all aspects of the network to simplified versions that retain essential features. The choice of approach depends on the analysis objectives and the available computational capacity.

In this context, the need arises to effectively and practically simplify WDNs, achieving a balance between precision and computational efficiency. Simplified models are particularly useful for optimization, strategic planning, and real-time operations, such as water quality monitoring and network maintenance. Simplification, though not trivial, must consider the network's topology and complexity.

This work focuses on developing an automated simplification methodology for WDNs based on simple algorithms that can be adjusted to user-defined parameters. Six independent algorithms are proposed to address different aspects of simplification, ranging from reducing individual elements like parallel pipes, terminal nodes, or series pipes to sets of elements like terminal blocks, blocks with multiple inputs/outputs, and nearby node simplification.

An innovative approach involves incorporating graph theory concepts to automatically identify complex structures in the network, allowing for more advanced and automated simplifications. To validate and evaluate the proposed algorithms, they are applied to various case studies using a specifically designed software tool. The results obtained demonstrate the efficacy of the algorithms in simplifying WDNs while maintaining hydraulic accuracy and enabling more efficient and practical analysis.

In summary, this work presents an innovative methodology for simplifying water distribution networks, with the potential to optimize their operation and contribute to the sustainable development of water supply systems.



Palabras clave español (máximo 5): modelos hidráulicos; teoría de grafos; Simplificación de redes de distribución de agua.

Palabras clave valenciano (máximo 5): models hidràulics; *teoría de grafos; *Simplificacion de xarxes de *distribucion d'aigua.

Palabras clave inglés (máximo 5):

Contenido

1. INTRODUCCIÓN:	13
1.1. IMPORTANCIA DE LOS MODELOS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA	13
1.2. IMPORTANCIA DE LA SIMPLIFICACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA	14
1.3. OBJETIVO GENERAL.....	15
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
2. ESTADO DEL ARTE	17
2.1. MODELOS MATEMÁTICOS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA	17
2.2. SOFTWARE DE EPANET Y SU TOOLKIT	18
2.3. TÉCNICAS Y ALGORITMOS DE SIMPLIFICACIÓN PARA REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA	19
2.3.1. LIMITACIONES GENERALES PARA LA SIMPLIFICACIÓN	20
2.4. ANTECEDENTES DE TRABAJOS PREVIOS	22
2.5. TEORÍA DE GRAFOS	24
2.5.1. CARACTERÍSTICAS DE UN GRAFO.....	25
2.5.2. ESTRUCTURAS DE DATOS PARA LA REPRESENTACIÓN DE GRAFOS	27
2.5.3. ARBOLES	29
2.5.4. CLASIFICACIÓN DE LOS GRAFOS.....	30
2.6. ALGORITMOS DE LA TEORÍA DE GRAFOS	34
2.7. APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE GRAFOS A LOS MODELOS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA	37
2.8. ALGORITMOS DE VALIDACIÓN PARA LA SIMPLIFICACIÓN DE RDA.....	40
2.8.1. ERROR MEDIO CUADRÁTICO.....	41
2.8.2. RAÍZ DEL ERROR CUADRÁTICO MEDIO	42
2.8.3. ÍNDICE DE NASH-SUTCLIFFE	43
2.9. MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN DE LA SIMPLIFICACIÓN	45
2.9.1. HOOKE & JEEVES	47
2.10. EFECTOS DE LA SIMPLIFICACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA	50
3. METODOLOGÍA DE SIMPLIFICACIÓN DE REDES	52

3.1. INTRODUCCIÓN	52
3.2. PROTOCOLO DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA	52
3.3. ALGORITMOS DE SIMPLIFICACIÓN INICIALES	54
3.3.1. SIMPLIFICACIÓN DE TUBERÍAS PARALELAS	55
3.3.2. SIMPLIFICACIÓN DE NODOS TERMINALES	62
3.3.3. SIMPLIFICACIÓN DE TUBERÍAS EN SERIE	66
3.3.4. SIMPLIFICACIÓN POR UNIÓN DE NODOS CERCANOS	76
3.4. ALGORITMOS BASADOS EN LA TEORÍA DE GRAFOS	78
3.4.1. BLOQUES TERMINALES	78
3.4.2. BLOQUES CON MÚLTIPLES ENTRADAS Y/O SALIDAS	84
3.5. ETAPAS DE LA SIMPLIFICACIÓN	99
3.6. PUNTOS DE CONTROL Y VALIDACIÓN DE LA SIMPLIFICACIÓN	104
4. CASOS DE ESTUDIO Y RESULTADOS	105
4.1. C-TOWN	105
4.1.1. DIÁMETRO ADMISIBLE VS RUGOSIDAD ADMISIBLE	105
4.1.2. RESULTADOS DE LA SIMPLIFICACIÓN	108
4.2. WOLF CORDERA	113
4.2.1. IMPACTO DE LOS PARÁMETROS EN LA SIMPLIFICACIÓN	114
4.3. NJ1	121
4.3.1. IMPACTO DE LOS PARÁMETROS EN LA SIMPLIFICACIÓN	121
4.3.2. RESULTADO DE LA SIMPLIFICACIÓN	124
5. CONCLUSIONES	128
6. DESARROLLOS FUTUROS	130
7. INDICIOS DE CALIDAD	131
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132

Figura 1 Esquema de funcionamiento de EPANET con herramientas de terceros (Iglesias-Rey et al., 2017).	19
Figura 2 Red Fossolo y su árbol generador.	30
Figura 3 Grafo no dirigido vs grafo dirigido.(Newman, 2018)	31
Figura 4 Matriz de adyacencia de grafo ponderado vs grafo no ponderado.(Godsil & Royle, 2001)	31
Figura 5 Grafo simple vs multígrafo.(Godsil & Royle, 2001)	32
Figura 6 Grafo cíclico vs acíclico.	32
Figura 7 Grafo conexo vs grafo desconexo.(Godsil & Royle, 2001)	33
Figura 8 Búsqueda en amplitud (Izquierda) y búsqueda en profundidad (Derecha) en un árbol. (Everitt & Hutter, 2015)	34
Figura 9 Algoritmo de detección de fugas.(Shekofteh et al., 2020)	38
Figura 10. Diagrama de flujo para el algoritmo de Hooke & Jeeves(Chaudhry et al., 2018)	49
Figura 11 Diagrama de flujo para el proceso de simplificación y validación.	54
Figura 12 identificación de tuberías paralelas adaptación de C-town (Marchi et al., 2014)	59
Figura 13 Red C-town con simplificación de tuberías paralelas.	60
Figura 14. Ejemplo de simplificación de tuberías paralelas.	61
Figura 15. Red original Rural network.	64
Figura 16. Red Rural network con simplificación de nudos terminales.	64
Figura 17. Unión de tuberías en serie.(Aguilera, 2021.)	73
Figura 18. Red Richmond standard.	74
Figura 19. Richmond standard simplificación de tuberías en serie.	76
Figura 20. Ejemplo de simplificación de nudos cercanos.	78
Figura 21. identificación de bloque terminal.	79

Figura 22. Red original Balerma	82
Figura 23. Red de Balerma con simplificación de bloques terminales.	83
Figura 24. Diagrama de flujo del algoritmo de simplificación de bloques con múltiples entradas.....	85
Figura 25. Diagrama de flujo de adaptación de algoritmo de Hooke & Jeeves.	93
Figura 26. Elementos de control para la red Balerma.	94
Figura 27. Red Balerma dividida en bloques.	95
Figura 28. Identificación de bloque a simplificar.....	96
Figura 29. sustitución de tuberías de entrada y salida de bloque a simplificar por válvulas.....	97
Figura 30. Primera etapa de la metodología de simplificación.	99
Figura 31. Segunda etapa de la metodología de simplificación.	100
Figura 32. Tercera etapa de la metodología de simplificación.....	101
Figura 33. Comparativa de resultados para diferencia de diámetros admisibles.....	107
Figura 34. Comparativa de resultados para diferencia de rugosidad admisible.	108
Figura 35. Elementos de control para la red C-town.....	109
Figura 36. Division en sectores de la red C-town.	110
Figura 37. Red C-town simplificada.	112
Figura 38. Elementos conservados de la red original C-town.....	113
Figura 39. Comparativa de diferencia de diámetro admisible en la simplificación de la red Wolf Cordera Ranch.....	116
Figura 40. Simplificacion para diferentes demandas máximas admisibles de la red Wolf Cordera Ranch	117
Figura 41. Elementos de control seleccionados para la red Wolf Cordera Ranch.	118
Figura 42. Division en sectores de la red Wolf Cordera Ranch.	118

Figura 43. Elementos que se mantienen de la red original de Wolf Cordera Ranch.....	119
Figura 44. topología de la red simplificada Wolf Cordera Ranch.....	120
Figura 45. Comparativa de simplificación de la red NJ1 con diferentes diámetros admisibles.....	122
Figura 46. Comparativa de simplificación de la red NJ1 para diferentes demandas base máxima admisible.	123
Figura 47. Elementos de control de la red NJ1.	124
Figura 48. evolución de alturas del nudo tras proceso de simplificación.....	125
Figura 49. comparación de caudales en la línea 17487 tras la simplificación.....	126
Figura 50. Elementos de la red NJ1 original que se mantienen tras la simplificación.....	127

Tabla 1. interpretación de valores del índice de Nash.....	44
Tabla 2 Clasificación de los métodos de optimización (Chapra et al., 2008)	47
Tabla 3 características de la adaptación de la red D-Town.....	59
Tabla 4 Características red D-town simplificación de paralelas	60
Tabla 5 Comparativa de características tuberías originales y tubería equivalente.....	61
Tabla 6 Comparativa de la red Rural Network con simplificación de nudos terminales.....	65
Tabla 7 distribución de caudales para simplificación de tuberías en serie.....	74
Tabla 8 Calculo de valores equivalentes para tuberías en serie.....	74
Tabla 9 característica de la red Richmond Standard.....	75
Tabla 10 Comparativa red original y red con simplificación tuberías en serie.....	75
Tabla 11. características de la red de Balerma.....	81
Tabla 12 Comparativa red Balerma simplificación de bloques terminales.....	83
Tabla 13 características de la red Balerma.....	94
Tabla 14 características del bloque a simplificar.....	97
Tabla 15 Simplificación inicial de bloques con múltiples entradas y salidas.....	98
Tabla 16 optimización por Hooke & Jeeves del bloque.....	98
Tabla 17. características de la red C-town.....	105
Tabla 18. Comparativa diferencia de diámetro admisible C-town.....	106
Tabla 19. Comparativa de simplificaciones con diferente % de rugosidad admisible en la red C-town .	108
Tabla 20 Comparativa de alturas en elementos de control de la red D-Town.....	110
Tabla 21 Comparativa de caudales en las líneas de control de la red D-Town.....	111
Tabla 22. características de la red Wolf Cordera Ranch.....	114

Tabla 23. Comparativa de simplificaciones con diferente % de diferencia de diámetro admisible en la red Wolf Cordera Ranch.....	115
Tabla 24 comparación de resultados para diferentes demandas base máxima admisible	116
Tabla 25 comparación de alturas de elemento de control en la red Wolf Cordera Ranch.....	120
Tabla 26 Comparativa de caudales en elementos de control de la red Wolf Cordera Ranch.....	121
Tabla 27. Comparativa de las simplificaciones de la red NJ1 con diferentes demandas base máxima admisible.	123
Tabla 28 Comparativa de alturas en elementos de control para la red NJ.....	124
Tabla 29 Comparativa de caudales en elementos de control para la red NJ.	125

1. INTRODUCCIÓN

1.1. IMPORTANCIA DE LOS MODELOS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

Las redes de distribución de agua (RDA) representan un componente esencial para el progreso de la sociedad, proporcionando suministro de agua potable para usos diversos como el hogar, la industria, el riego y la prevención de incendios, entre otros. Estos sistemas son intrincados y caracterizados por cambios dinámicos, lo que complica su gestión. La habilidad de garantizar la satisfacción de la demanda de agua en los nodos de consumo, junto con la presión adecuada y la calidad requerida, impulsa la necesidad de contar con modelos matemáticos que faciliten el análisis y la optimización del rendimiento de estas infraestructuras hidráulicas, al tiempo que minimizan los costos operativos asociados.

Un modelo de red en el contexto de distribución de agua es una herramienta poderosa que combina representaciones matemáticas y técnicas de simulación para emular el funcionamiento y comportamiento de una red de distribución de agua en condiciones específicas. La modelización de esta red abarca la compilación detallada de información fundamental, que abarca tanto la estructura física como las demandas operativas de la red.

En términos de la estructura física, se reúnen datos exhaustivos sobre la topología de la red, lo que incluye la disposición y la interconexión de tuberías, así como detalles específicos como los diámetros, longitudes, rugosidades y materiales de estas tuberías. A su vez, se capturan detalles concernientes a otros elementos de la red, como válvulas, bombas, depósitos y embalses, que influyen en su funcionamiento hidráulico global.

No obstante, la representación del sistema va más allá de la estructura física y considera también las demandas de agua en distintos puntos de suministro. Esta parte crucial del modelo abarca información sobre los patrones de consumo, es decir, cómo varía la demanda a lo largo del día y las estaciones, y también incorpora requisitos específicos de calidad del agua en cada punto. Estos datos son esenciales para evaluar si el sistema es capaz de satisfacer las demandas y mantener la calidad del agua en condiciones diversas.

En conjunto, un modelo de red de distribución de agua se convierte en un simulador integral que permite a los ingenieros y profesionales del agua analizar diversos escenarios, desde cambios operativos hasta eventos excepcionales, proporcionando información esencial para tomar

decisiones informadas, optimizar el rendimiento de la red y garantizar el suministro de agua eficiente y de alta calidad a las comunidades y usuarios.

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 (Ostfeld, 2015). 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.

Los modelos matemáticos son empleados para examinar y administrar las redes de distribución de agua. Estos facilitan el minimizar el coste operativo al facilitar el análisis y la mejora del rendimiento de las infraestructuras hídricas. Estos modelos son utilizados por investigadores, gestores de empresas de suministro de agua y operadores para abordar los problemas de gestión de RDA en distintas fases de ellas. (Bello et al., 2019). Estos son esenciales para analizar el comportamiento de la red y comprender las posibles implicaciones en diversos escenarios. por ejemplo, permiten anticipar los ajustes operativos necesarios si una tubería principal queda fuera de servicio, así como en la planificación de la expansión de las redes para acomodar el crecimiento de la población. Estas herramientas facilitan una comprensión más profunda de la dinámica de las redes de distribución de agua y permiten la toma de decisiones más informadas y efectivas para garantizar un suministro confiable y eficiente.

1.2. IMPORTANCIA DE LA SIMPLIFICACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

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 de optimización, 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. (Martínez-Solano et al., 2014).

La simplificación de modelos en las redes de distribución de agua aporta una serie de ventajas que impactan directamente en la operatividad y eficiencia de estos sistemas. Una de las principales ventajas radica en la capacidad para reducir la complejidad inherente de las redes, lo que a su vez facilita el desarrollo de algoritmos y estrategias de supervisión y control más efectivos. Al eliminar elementos no esenciales o redundantes a través de la simplificación, se crea un entorno propicio para focalizar la atención en los componentes críticos de la red. Esto permite un enfoque más preciso en la detección temprana de posibles anomalías y en la toma de decisiones estratégicas, mejorando significativamente la capacidad de respuesta del sistema en situaciones de emergencia o cambios en la demanda.

Además, la simplificación tiene el potencial de acelerar los algoritmos de optimización utilizados en el diseño y gestión de las redes de distribución de agua. Al reducir la cantidad de datos y variables involucradas, se disminuye la carga computacional requerida para realizar cálculos y simulaciones. Esto no solo optimiza el tiempo de procesamiento, sino que también permite la exploración de múltiples escenarios en un período más corto, lo que resulta fundamental en la toma de decisiones ágiles y eficientes.

No obstante, es fundamental reconocer que la simplificación no es una estrategia exenta de limitaciones. A medida que se simplifica un modelo de RDA, se pierde parte de la información detallada que caracteriza la red original. Esta pérdida de información puede resultar relevante en ciertos análisis y escenarios, como en la evaluación de comportamientos hidráulicos específicos o en la representación precisa de condiciones extremas. Por lo tanto, al optar por la simplificación, es crucial sopesar cuidadosamente la necesidad de eficiencia computacional con la precisión requerida para los objetivos particulares del estudio. En última instancia, el proceso de simplificación debe ser cuidadosamente adaptado a las necesidades y metas específicas, asegurando que los beneficios superen las limitaciones y que el resultado final siga siendo representativo y útil en el contexto de la gestión y optimización de redes de distribución de agua.

1.3. OBJETIVO GENERAL.

Este trabajo tiene como objetivo principal el presentar una metodología de simplificación automática de modelos de distribución de agua basada en la teoría de grafos y elaborados con la Toolkit de Epanet 2.2 que pueda ser utilizado en cualquier red existente con un previo estudio de sus características para la determinación de elementos de control.

1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos que se desarrollaran para obtener el objetivo general son los siguientes:

1. Revisión bibliográfica de los métodos de simplificación existentes.
2. Estudio y aplicación de la teoría de grafos.
3. Plantear y desarrollar algoritmos de selección y simplificación automáticos de los diferentes elementos que componen la RDA.
4. Validación de los algoritmos independientes con ejemplos que se adapten a estos.
5. Evaluar el impacto de la simplificación de la red en la gestión y operación de la red de distribución de agua.
6. Definición de parámetros para selección de elementos de control en los diferentes casos de estudio.
7. Implementación en conjunto de los algoritmos de simplificación y su respectiva validación en los elementos de control definidos.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. MODELOS MATEMÁTICOS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

Ostfeld (2015) define una red de distribución de agua como un conjunto interconectado de fuentes, tuberías y elementos de control hidráulico (por ejemplo, bombas, válvulas, reguladores, depósitos) que suministran a los consumidores cantidades de agua prescritas a las presiones y calidades de agua deseadas. Estos sistemas suelen describirse como un grafo, en el que los enlaces representan las tuberías y los nodos definen las conexiones entre tuberías, elementos de control hidráulico, consumidores y fuentes. El comportamiento de una red de distribución de agua se rige por:

- 1) Las leyes físicas que describen las relaciones de flujo en las tuberías y los elementos de control hidráulico
- 2) Las demandas de los consumidores.
- 3) El trazado del sistema.

Un modelo de red es una representación matemática y computacional de una red de distribución de agua, diseñada para simular y analizar diversos comportamientos de la red en condiciones definidas por el usuario. La modelización de una red de distribución de agua implica recopilar datos sobre la estructura existente, como la topología de la red, incluyendo la ubicación y conexión de tuberías, así como características físicas como diámetro, longitud, rugosidad y material de las tuberías. También se recopila información sobre elementos adicionales de la red, como válvulas, bombas, depósitos y embalses.

Además de la estructura física, el modelo también considera información sobre la demanda de agua en diferentes puntos de suministro. Esto incluye datos sobre los patrones de consumo en cada punto, es decir, cómo varía la demanda a lo largo del tiempo, así como las necesidades específicas de calidad del agua en cada punto.

Con todos estos datos recopilados, el modelo de red permite simular y analizar el flujo de agua a través de la red, evaluar la presión en diferentes puntos, calcular los caudales de agua en las tuberías, y estudiar otros parámetros hidráulicos relevantes. También puede utilizarse para analizar el impacto de diferentes escenarios, como cambios en la demanda, reparaciones o adiciones a la infraestructura, y evaluar la eficiencia y desempeño de la red en diversas condiciones operativas.

Una vez recopilados estos datos, se procede a crear un modelo matemático que represente la red de distribución de agua real. Este modelo se utiliza para analizar los diversos comportamientos que la red experimenta frente a diferentes escenarios, como variaciones en la demanda, rotura de tuberías, fallos en bombas u otros problemas que el usuario desee probar.

En la actualidad, existen varios softwares especializados en la creación de modelos de este tipo, que son capaces de simular redes de distribución de agua de gran tamaño. Algunos ejemplos de estos softwares son EPANET (Rossman et al., 2021), WaterGEMS (Bentley, 2022), InfoWater, etc.

En el presente trabajo de simplificación de modelos de redes de distribución de agua, se llevará a cabo utilizando el software EPANET 2.2. EPANET es un software ampliamente utilizado y reconocido en la comunidad de ingeniería hidráulica para la modelización y simulación de redes de distribución de agua. Ofrece herramientas para crear y analizar modelos hidráulicos de redes de agua, así como para evaluar el rendimiento de la red en diferentes situaciones.

Mediante el uso de EPANET 2.2, se podrán realizar las simplificaciones y optimizaciones necesarias en el modelo de la red de distribución de agua, lo que permitirá estudiar y comprender mejor su comportamiento, identificar áreas problemáticas y proponer soluciones eficientes.

2.2. SOFTWARE DE EPANET Y SU TOOLKIT

EPANET (Rossman et al., 2021) es un modelo computacional de dominio público creado por la EPA (Environmental Protection Agency) utilizado para crear simulaciones en periodos prolongados del comportamiento hidráulico y de calidad del agua en redes de suministro a presión. Este proporciona un entorno integrado para la edición de los datos de entrada de la red, realizar simulaciones hidráulicas y ver los resultados en distintos formatos, como mapas de red codificados por colores, tablas de datos, series temporales y trazados de contornos.

El Toolkit de Epanet (Rossman, 1999) es una colección de funciones que permite a los usuarios el crear complementos adaptados a las necesidades de cada usuario. Este permite leer las propiedades de los elementos que componen la red, modificar las propiedades deseadas, realizar varias simulaciones hidráulicas con las diferentes modificaciones realizadas y obtener los resultados de ellas. Es especialmente útil para el desarrollo de aplicaciones como pueden ser los modelos de

optimización que requieren de un gran número de simulaciones para cada dato de entrada modificado.

Este proporciona una interfaz de programación de aplicaciones (API) la cual permite a los usuarios leer y modificar las propiedades de los diferentes elementos que componen la RDA mientras realiza varias simulaciones hidráulicas, esto es de mucha utilidad en aplicaciones como modelos de optimización o simplificación de redes como es este caso, donde se requieren realizar múltiples simulaciones para cada conjunto de datos de entrada y almacenar los resultados de manera eficiente. Esto nos permite analizar y comparar los efectos de las diferentes optimizaciones realizadas a la red, lo cual es fundamental para la toma de decisiones en la operación del sistema.

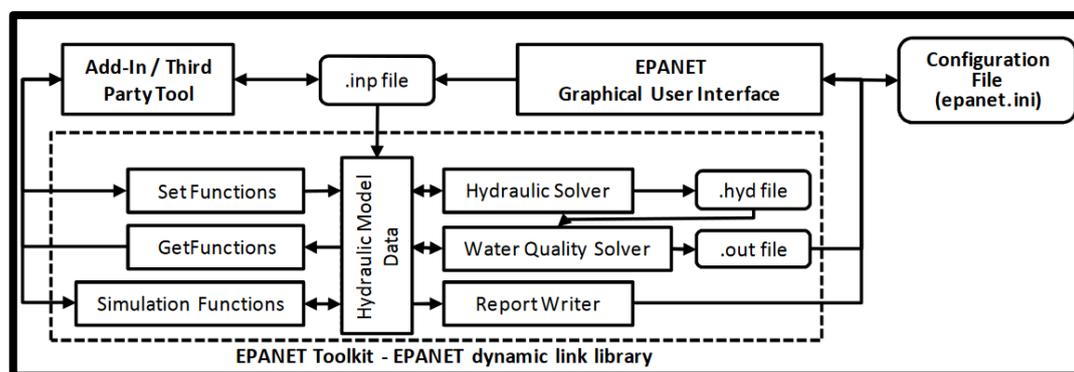


Figura 1 Esquema de funcionamiento de EPANET con herramientas de terceros (Iglesias-Rey et al., 2017).

2.3. TÉCNICAS Y ALGORITMOS DE SIMPLIFICACIÓN PARA REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

La simplificación de las redes de distribución de agua es una parte crucial para lograr una mayor eficiencia computacional del modelo, así como para facilitar la comprensión de redes con un gran número de elementos al representar únicamente los elementos críticos. La simplificación de redes, también conocida como *skeletonization* en la literatura en inglés, no es un proceso único, sino más bien un conjunto de procesos que pueden aplicarse por separado para permitir al usuario alcanzar el nivel de precisión deseado. El grado de simplificación debe ser un compromiso entre el nivel de precisión requerido por el usuario y la eficiencia computacional de los algoritmos utilizados.

Los modelos simplificados pueden proporcionar una representación más compacta y comprensible de la red, al eliminar elementos menos relevantes o redundantes. Esto puede incluir la eliminación de tuberías de menor diámetro o con menor impacto en el flujo, la agrupación de nodos similares en uno solo, la simplificación de la topología de la red, entre otros. Al simplificar la red, se reduce la complejidad computacional del modelo, lo que permite un análisis más eficiente y rápido.

Es importante tener en cuenta que la simplificación de la red debe realizarse de manera cuidadosa, ya que una simplificación excesiva puede llevar a una pérdida significativa de precisión en los resultados del modelo. Por lo tanto, es necesario encontrar el equilibrio adecuado entre la precisión requerida y la eficiencia computacional, adaptando la simplificación a las necesidades y objetivos específicos del usuario.

La simplificación de redes de distribución de agua es un proceso clave para mejorar la eficiencia computacional y la comprensión de los modelos. Mediante la eliminación de elementos no críticos y la reducción de la complejidad de la red, se logra un análisis más eficiente y se facilita la toma de decisiones en la gestión y optimización de la red.

2.3.1. LIMITACIONES GENERALES PARA LA SIMPLIFICACIÓN

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA, 2013) ha propuesto una guía que sugiere los elementos mínimos para una red de distribución de agua simplificada. Estos elementos son los siguientes:

1. Incluir al menos el 50% de la longitud total de tuberías de la red de distribución.
2. Incluir al menos el 75% del volumen total de las tuberías de la red de distribución.
3. Las tuberías de diámetro igual o mayor a 12 " (301,8 mm) deben estar presentes en la red simplificada.
4. Las tuberías de diámetro igual o mayor a 8" (203,20 mm) que conectan zonas de influencia de diferentes fuentes, instalaciones de almacenamiento, áreas de mayor demanda, bombas y válvulas de control, o que se sabe o se espera que sean transportadoras significativas de agua, también deben estar incluidas.
5. Incluir todas las tuberías de diámetro igual o mayor a 6" (152,4 mm) que conectan áreas remotas del sistema de distribución a la parte principal del mismo.
6. Las instalaciones de almacenamiento que tengan controles o configuraciones aplicadas para controlar el estado abierto/cerrado de la instalación, reflejando las operaciones estándar, deben ser consideradas.

7. Las estaciones de bombeo activas con controles o configuraciones aplicadas para controlar su estado de encendido/apagado, reflejando las operaciones estándar, también deben estar presentes.
8. Incluir todas las válvulas de control activas y otras características del sistema que puedan afectar significativamente el flujo de agua a través del sistema de distribución, como interconexiones con otros sistemas o válvulas entre zonas de presión, entre otras.

Al seguir esta guía de elementos mínimos, se asegura que la red simplificada contenga los componentes más importantes y representativos del sistema de distribución de agua, permitiendo una reducción significativa en la complejidad de la red sin comprometer su capacidad para operar de manera eficiente y cumplir con los estándares y regulaciones aplicables. Las limitaciones generales para la simplificación de la red de distribución de agua están relacionadas con la asignación de los criterios de validación por parte del usuario. Aunque se brinda la opción de asignar un porcentaje de diferencia de caudal o presión como criterio de validación, es importante entender que una simplificación puede tener un impacto significativo en un nodo específico de la red.

Sin embargo, cuando la red cuenta con una lista extensa de elementos de control, es posible que ciertas simplificaciones no afecten significativamente al resto de la red y puedan obtener una validación positiva en general. Esto se debe a que la presencia de múltiples elementos de control permite mantener el equilibrio y la estabilidad hidráulica en la red, incluso si se realizan cambios en ciertos puntos. La libertad que tiene el usuario para establecer los límites y criterios de validación es una ventaja significativa, ya que le permite personalizar la simplificación de la red según sus necesidades y expectativas específicas. Esto asegura que los cambios realizados en la red simplificada se mantengan dentro de los parámetros deseados y que la red resultante cumpla con los requisitos establecidos por el usuario.

Es importante que el usuario comprenda la importancia de establecer criterios de validación adecuados y realistas, ya que una simplificación excesiva o inapropiada puede llevar a resultados poco confiables y a decisiones erróneas en el diseño y gestión de la red de distribución de agua. Por lo tanto, es fundamental que el usuario considere cuidadosamente los criterios de validación y busque el equilibrio entre la simplificación deseada y el cumplimiento de los requisitos de operación y rendimiento de la red.

2.4. ANTECEDENTES DE TRABAJOS PREVIOS

La simplificación de redes de distribución de agua es un tema que se viene estudiando desde el pasado siglo, Eggener & Polkowski, (1976) estudiaron por primera vez el proceso de esqueletización mediante la eliminación sistemática de tuberías en la red de distribución de agua de Menomonie (Wisconsin). Descubrieron que, al eliminar un gran número de tuberías bajo demandas usuales, las presiones no se veían afectadas significativamente.

Jeppson, (1982) estudió la reducción de redes reemplazando varias tuberías conectadas en serie o en paralelo por una única tubería equivalente. Trabajo que luego continuarían desarrollando Jung et al, (2007) derivando fórmulas para calcular diámetros equivalentes de tuberías en serie y en tuberías en paralelo basadas en la ecuación de pérdida de carga de Hazen-Williams. Sin embargo, estos dos métodos no son aplicables si las tuberías de una red no están ni en serie ni en paralelo.

Para superar esta limitación, Hamberg & Shamir, (1988) propusieron dos modelos para reducir el tamaño de las redes:

1. una combinación paso a paso de elementos.
2. una representación continua no lineal del sistema en su totalidad.

En el método de combinación paso a paso, las tuberías y las tomas de agua que varían a lo largo del tiempo se reemplazan por sus equivalentes. Una conductancia distribuida aéreamente, que es una función de las propiedades de las tuberías y la densidad aérea, es el vínculo entre una función potencial relacionada con las cargas y el campo de flujo. Utilizando esto, se puede obtener un modelo reducido para el campo de flujo de un sistema existente a un potencial prescrito.

Posteriormente, fueron propuestos varias metodologías de simplificación de redes como la propuesta por Saldarriaga et al, (2009) proponen una metodología de simplificación basándose en el concepto de la resiliencia, analizando el efecto de cada tubería en el índice de resiliencia de la RDA completa y luego proceden a remover los que tienen un impacto mínimo en esta, asegurándose que todos los nudos de consumo sigan conectados. Además, los autores consideran el impacto en la calidad del agua después de remover las tuberías y aplican un factor de corrección al coeficiente de pared de las tuberías, obteniendo así una red que puede simplificar tuberías manteniendo tanto resultados hidráulicos como de calidad del agua.

Martinez Alzamora et al., (2014), presentaron una metodología para la reducción de modelos de redes descritos por un sistema de ecuaciones algebraicas no lineales. El enfoque calcula un modelo de red equivalente al original, pero con menos componentes. Este procedimiento tiene la ventaja de preservar la no linealidad del modelo original y aproximar el modelo original en un amplio rango de condiciones de operación, en comparación con la simple linealización.

Hirrel (2010) es uno de los primeros autores en utilizar la teoría de grafos para la simplificación de RDA, este propuso una metodología de simplificación automática combinando la esqueletización con algoritmos de recorrido de grafos. El objetivo de este método es manipular la topología de la red de manera que se minimicen los cálculos hidráulicos. Esta línea de investigación trae buenos resultados y curiosidad sobre el uso de la teoría de grafos en las RDA y es continuada por Zheng et al, (2013) quienes proponen un enfoque novedoso para el diseño y simplificación de redes de distribución de agua utilizando técnicas de teoría de grafos.

1. En primer lugar, se descompone la red de agua completa en diferentes subredes basadas en la conectividad de los componentes de la red.
2. La red original se simplifica a un árbol dirigido aumentado.
3. Las subredes son reemplazadas por nodos aumentados y se crean enlaces dirigidos para conectarlos.
4. Se emplea el algoritmo de evolución diferencial (DE) para optimizar cada subred basándose en la secuencia especificada por los enlaces dirigidos asignados en el árbol aumentado.

En lugar de optimizar la red original en su conjunto, las subredes se optimizan de forma secuencial mediante el algoritmo. Se establece una tabla de selección de soluciones para cada subred (excepto para las subredes que incluyen nodos de suministro) y la solución óptima de toda la red original se obtiene finalmente utilizando estas tablas de selección de soluciones. Además, se aplica un algoritmo de reacondicionamiento a las subredes para producir una solución aproximadamente óptima para toda la red original. Esta solución especifica regiones prometedoras para que el algoritmo de optimización final optimice aún más las subredes.

Giustolisi et al, (2011) Sostienen que los sistemas hidráulicos complejos y de gran tamaño requieren ser divididos en módulos para simplificar el análisis y las tareas de gestión. En la teoría

de redes complejas, proponen el índice de modularidad como una medida de la fortaleza de la división de la red en comunidades. Sin embargo, el índice de modularidad necesita ser revisado teniendo en cuenta la especificidad de los sistemas hidráulicos. En este sentido, se presenta inicialmente el índice de modularidad clásico y luego se adapta y modifica para las RDA. Además, se propone una estrategia de optimización multiobjetivo para la segmentación óptima. El marco de optimización se basa en la maximización del índice de modularidad orientado a RDA en comparación con la minimización del costo de los dispositivos recién instalados con el fin de segmentar las RDA.

2.5. TEORÍA DE GRAFOS

La teoría de grafos se originó en el siglo XVIII, cuando Leonhard Euler planteó la solución al problema de los puentes de Königsberg en 1736. El problema consistía en encontrar un camino que cruzara todos los puentes una vez y volviera al punto de partida. Euler representó este problema como un grafo y demostró que no era posible encontrar dicho camino, sentando las bases de la teoría de grafos.

Un grafo se compone de un conjunto no vacío de objetos llamados vértices o nodos, y un conjunto de aristas o líneas que conectan estos nodos. Las aristas pueden ser orientadas (con dirección) o no orientadas (sin dirección).

La teoría de grafos proporciona un enfoque computacionalmente eficiente para el análisis y diseño de redes de distribución de agua, así como otros tipos de sistemas. Al representar la infraestructura de tuberías y nodos como un grafo ponderado y dirigido, se pueden aplicar algoritmos y métodos de la teoría de grafos para abordar diversos problemas en el contexto de las redes de agua. Estos problemas incluyen la optimización del flujo de agua, la determinación de rutas óptimas o caminos más cortos entre dos nodos, la minimización de pérdidas de presión, la evaluación de la conectividad y la robustez de la red, entre otros.

Estas técnicas proporcionan herramientas para mejorar la eficiencia operativa, la resiliencia y la sostenibilidad de los sistemas de distribución de agua. Contribuyen a garantizar un suministro confiable, equitativo y eficiente de este recurso vital. Además, la teoría de grafos se aplica en una amplia gama de campos, como la planificación de redes de transporte, el diseño de redes de comunicación y el análisis de redes sociales, entre otros.

2.5.1. CARACTERÍSTICAS DE UN GRAFO

De acuerdo con Godsil & Royle,(2001) y Newman, (2018) los diferentes elementos que componen un grafo son:

- **Vértices (Nodos):** Son los elementos fundamentales de un grafo. Representan entidades individuales, en nuestro caso son los nudos de la red.
- **Aristas (líneas):** Son los enlaces que conectan los vértices de un grafo. En el caso de las redes de distribución de agua podríamos considerar esto como la longitud de las tuberías, pérdida de carga generada por las tuberías etc.
- **Peso (Costo):** Es el valor asociado a una arista, indica una medida o característica particular de cada arista, como puede ser, distancia, diámetro, capacidad, etc. Con la finalidad de mantener las tuberías principales hemos definido el peso como la resistencia generada por una tubería, donde la resistencia R viene dada por

$$R = \frac{10.61}{C_{HW}^{1.85}} * L \quad (1)$$

donde:

1. C_{hw} es el coeficiente de Hazen Williams de la tubería.
 2. \emptyset es el diámetro de la tubería.
 3. L es la longitud de la tubería.
- **Grado de un vértice:** es el número de aristas incidentes en el vértice, en el caso de las RDA, es el número de líneas que se conectan a los nudos, sean de entrada o de salida. El grado de un vértice puede ser utilizado para analizar su conectividad y la estructura del grafo. El grado de un vértice es útil en esta metodología para identificar tanto los nudos terminales, que son aquellos nudos que se encuentran en el punto terminal de una ramificación y cuentan con conectividad de grafo uno, como a los nudos intermedios que son aquellos nudos que se encuentran en el medio de dos nudos y su conectividad es de grado dos, es decir, solo cuenta con las tuberías que lo conectan a otros dos nudos.

- Ciclos y caminos: Un ciclo es una secuencia de vértices y aristas que permite regresar al mismo vértice después de recorrer un camino. Un camino es una secuencia que visita todos los vértices de un grafo solo una vez.
- Conectividad: Un grafo se considera conexo si existe al menos un camino entre cualquier par de vértices de este, si un grafo no es conexo, se puede descomponer en varios componentes conexos, es decir, bloques que tienen todos sus vértices conectados entre sí, pero no con vértices fuera del componente.
- Puente o Istmo: Es una arista cuya eliminación desconectaría el grafo en dos partes, es una conexión esencial en el grafo. A partir de encontrar los Istmos podemos delimitar los bloques terminales de la RDA, es decir, aquellos bloques, mallados o ramificados que cuenten con una sola conexión al cuerpo principal de la RDA.
- Dígrafo: Es un tipo de grafo en el cual las aristas tienen una dirección asignada, es decir, tienen un vértice de origen y vértice de destino.
- Camino de Hamilton: Es un camino que visita cada vértice exactamente una vez y el punto final y de inicio son el mismo.
- Camino de Euler: Es un camino que recorre cada arista exactamente una vez, permitiendo visitar los vértices más de una vez.
- Nivel de un vértice: Es su posición en una estructura de árbol, representa la longitud del camino más corto entre la raíz, en caso de la red alguno de los embalses, hasta este vértice.

Cada una de las características previamente definidas desempeñará un papel esencial en los algoritmos de simplificación desarrollados en este trabajo. Empezando por los "istmos" y "grados" que actuarán como marcadores para la identificación de bloques y nudos terminales, respectivamente. Estos indicadores son fundamentales para determinar qué partes de la red pueden simplificarse y cuáles deben mantenerse intactas.

La noción de "dígrafo" será utilizada para comprender la dirección del flujo de fluido en la RDA y asegurarse de que esta dirección se conserve durante las etapas de simplificación. Esto es crucial para mantener la coherencia con el modelo original y garantizar una representación hidráulica precisa.

Los "caminos de Euler" y "caminos de Hamilton" serán herramientas valiosas para optimizar las rutas de flujo de agua en la red. Estos caminos permitirán simplificar la RDA al reducir la cantidad de tuberías necesarias sin comprometer la eficiencia hidráulica. Esto contribuirá significativamente a la eficacia de la simplificación.

Por último, el concepto de "nivel" se empleará para jerarquizar los elementos de la red. Esto ayudará a identificar nodos críticos y áreas prioritarias para la simplificación, lo que, a su vez, permitirá un enfoque más estructurado en la reducción de complejidad de la RDA.

En resumen, estas características no solo enriquecerán la metodología de simplificación de RDA, sino que también servirán como cimientos sólidos para la creación de algoritmos efectivos y automatizados que mantengan la precisión hidráulica mientras reducen la complejidad de la red.

2.5.2. ESTRUCTURAS DE DATOS PARA LA REPRESENTACIÓN DE GRAFOS

En el ámbito computacional existen diversas formas de representar y almacenar grafos en una computadora. La elección de la estructura de datos adecuada depende de las características del grafo y los algoritmos que se utilizarán para manipularlo. Dos de las estructuras más utilizadas son las listas y las matrices, y a menudo se combinan ambas para lograr un enfoque óptimo.

Las listas son ampliamente utilizadas en grafos dispersos, es decir, aquellos en los que solo una pequeña proporción de los posibles pares de nodos están conectados por aristas. Esto se debe a que las listas ofrecen un uso eficiente de la memoria al almacenar solo los nodos vecinos de cada nodo, lo que evita ocupar espacio innecesario para los nodos no conectados. Al tener una estructura dinámica, las listas pueden crecer o reducirse según sea necesario, lo que las hace adecuadas para grafos de tamaño variable.

Dentro de las estructuras de lista, existen dos tipos comunes de representación de grafos (Newman, 2018):

- Lista de incidencia. En este enfoque, las aristas del grafo se representan utilizando un vector de pares ordenados (en el caso de grafos dirigidos) o no ordenados (en el caso de grafos no dirigidos). Cada par de elementos del vector representa una arista, donde el primer elemento indica el nodo de origen y el segundo elemento indica el nodo de destino. Este enfoque es eficiente en términos de uso de memoria, ya que solo almacena las aristas

del grafo. Sin embargo, puede requerir búsquedas lineales para encontrar información específica, como todos los nodos adyacentes a un nodo dado.

- Lista de adyacencia. En este enfoque, cada nodo del grafo tiene asociada una lista que contiene los nodos adyacentes a él. En el caso de grafos no dirigidos, esto puede llevar a redundancia de información, ya que, si el nodo A es adyacente al nodo B, entonces el nodo B también será adyacente al nodo A. Sin embargo, este enfoque permite búsquedas rápidas de nodos adyacentes a un nodo dado, ya que solo es necesario examinar la lista asociada a ese nodo. Aunque puede requerir más almacenamiento debido a la redundancia, es útil en situaciones donde las búsquedas de adyacencia son frecuentes y necesitan ser eficientes.

La elección entre lista de incidencia y lista de adyacencia depende de las características del grafo y los requerimientos del algoritmo en particular. En general, la lista de adyacencia es preferida cuando las búsquedas de adyacencia son frecuentes y la eficiencia es prioritaria, mientras que la lista de incidencia puede ser más adecuada en casos donde se desea un uso de memoria más eficiente y no se realizan tantas búsquedas específicas.

Por otro lado, las matrices son preferidas en grafos densos, donde la mayoría de los pares de nodos están conectados por aristas. Aunque las matrices ofrecen acceso rápido a la información de adyacencia y son eficientes para comprobar la existencia de una arista, pueden consumir grandes cantidades de memoria, especialmente en grafos de gran tamaño. Dentro de las estructuras matriciales, se encuentra dos enfoques comunes para representar grafos:

- Matriz de incidencia. En este enfoque, el grafo se representa mediante una matriz de dimensiones A (aristas) por V (vértices), donde cada celda de la matriz almacena información sobre la conexión entre una arista y un vértice. Si una arista está conectada a un vértice, el valor de la celda correspondiente es 1; de lo contrario, es 0. Esta matriz proporciona información completa sobre las conexiones entre aristas y vértices en el grafo. Sin embargo, puede consumir más espacio de almacenamiento, especialmente para grafos con muchas aristas y pocos vértices.
- Matriz de adyacencia. En este enfoque, el grafo se representa mediante una matriz cuadrada M de tamaño V por V , donde V es el número de vértices en el grafo. Cada celda de la matriz indica si existe una arista entre un par de vértices. Si hay una arista entre el vértice x y el vértice y , el elemento $M[x][y]$ (o $M[y][x]$ en caso de grafos no dirigidos) es 1; de lo

contrario, es 0. Esta matriz proporciona una representación compacta de las conexiones entre los vértices del grafo, pero puede consumir más memoria en grafos densos debido a su tamaño cuadrado.

La elección entre matriz de incidencia y matriz de adyacencia depende del tipo de grafo y los algoritmos que se utilizarán. La matriz de incidencia es útil cuando se necesita información detallada sobre las conexiones entre aristas y vértices, mientras que la matriz de adyacencia es eficiente para consultas rápidas sobre la existencia de una arista entre un par de vértices. Es importante considerar el equilibrio entre el uso de memoria y el acceso eficiente a la información del grafo al seleccionar la estructura matricial adecuada.

Es importante tener en cuenta que la elección entre listas y matrices depende de la naturaleza del grafo y los requisitos del algoritmo específico que se utilizará. En algunos casos, puede ser necesario combinar ambas estructuras para aprovechar las ventajas de cada una. Además, existen otras estructuras de datos más avanzadas, como las estructuras de adyacencia dispersa, que ofrecen un equilibrio entre el uso eficiente de memoria y el acceso rápido a la información de adyacencia.

2.5.3. ARBOLES

Un árbol es un tipo especial de grafo que no contiene ciclos y que conecta todos sus vértices de manera única. Se puede visualizar como una estructura jerárquica en forma de árbol, donde un vértice se designa como la raíz y los demás vértices se organizan en niveles o capas a medida que se alejan de la raíz. Cada vértice, excepto la raíz, tiene un único vértice padre y puede tener varios vértices hijos. Un ejemplo común de árbol es un árbol genealógico, donde cada nodo representa un individuo y las aristas representan las relaciones de parentesco.

Un aspecto importante de los árboles es que en un grafo con n vértices, un árbol siempre tiene exactamente $n-1$ aristas. Esto se debe a que cada vértice, excepto la raíz, tiene una única arista que lo conecta a su padre. Además, hay n^{n-2} árboles posibles para un grafo de n vértices.

El estudio de los árboles es de gran importancia debido a su capacidad para conectar todos los vértices de un grafo utilizando el menor número posible de aristas. Esto tiene aplicaciones en diversos campos, como el análisis filogenético para determinar el parentesco entre especies, así como en el estudio del parentesco entre lenguas y otras entidades relacionadas. Los árboles proporcionan una estructura eficiente para representar relaciones jerárquicas y su estudio permite comprender mejor la evolución y las conexiones entre diferentes entidades en diversos campos de investigación. En la Figura 2 se puede ver la red de Fossolo y su respectivo árbol generador, creado

utilizando una variación del algoritmo de Prim generada para la metodología presentada, con el objetivo de que, si existiese más de un camino, se realizara una comparativa entre la capacidad de transporte de ambos caminos y elegir el que obtenga un mayor valor.

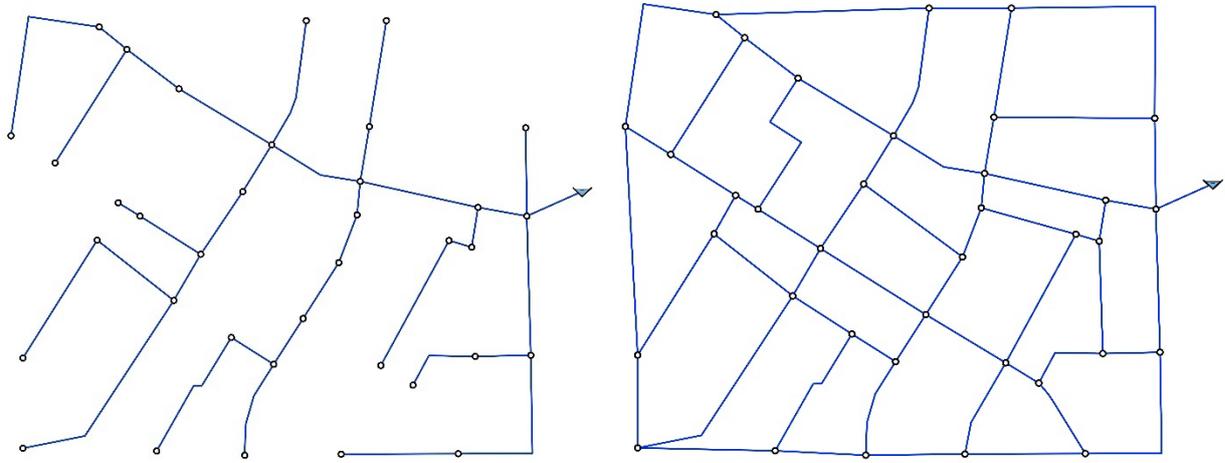


Figura 2 Red Fossolo y su árbol generador.

2.5.4. CLASIFICACIÓN DE LOS GRAFOS.

Los grafos pueden ser clasificados de diversas maneras según se considere su dirección, peso, simplicidad, presencia de ciclos y nivel de conectividad. A continuación, se explorarán las características principales de estas clasificaciones:

1. Grafos dirigidos vs. Grafos no dirigidos: En un grafo dirigido (Figura 3 derecha), las aristas tienen una dirección asociada. Esto significa que se puede viajar en una dirección específica desde un vértice de origen hacia un vértice de destino a lo largo de cada arista. Los grafos dirigidos se utilizan para representar relaciones asimétricas o dependencias unidireccionales entre entidades. Por otro lado, en un grafo no dirigido (Figura 3 Izquierda), las aristas no tienen una dirección asociada y se puede viajar en ambas direcciones entre los vértices. Los grafos no dirigidos se utilizan para representar relaciones simétricas o interacciones bidireccionales.

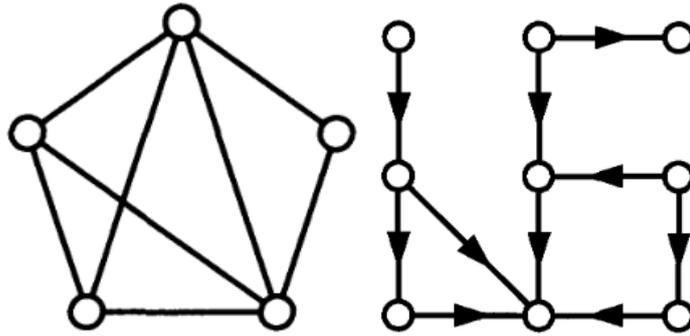


Figura 3 Grafo no dirigido vs grafo dirigido. (Newman, 2018)

2. Grafos ponderados vs. Grafos no ponderados: En un grafo ponderado (Figura 4, derecha), cada arista tiene asignado un peso o valor numérico. Este peso puede representar una medida, una distancia, un costo u otra métrica relevante. Los grafos ponderados se utilizan para modelar situaciones en las que la magnitud o importancia de la relación entre vértices es relevante. En cambio, en un grafo no ponderado (Figura 4, izquierda), todas las aristas tienen el mismo valor o no tienen ningún valor asociado. Los grafos no ponderados se utilizan para representar relaciones en las que la presencia o ausencia de una conexión es lo más importante.

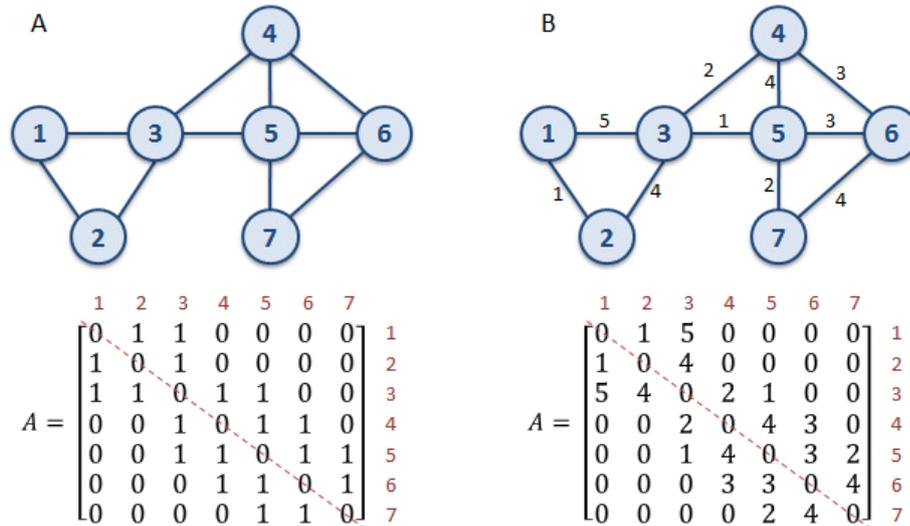
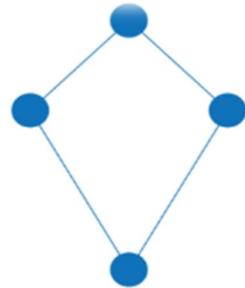


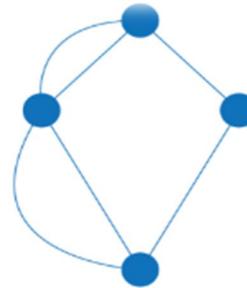
Figura 4 Matriz de adyacencia de grafo ponderado vs grafo no ponderado. (Godsil & Royle, 2001)

3. Grafos simples vs. Grafos multígrafo: En un grafo simple (Figura 5, izquierda), no hay más de una arista que conecte un par de vértices. Esto significa que no se permiten aristas múltiples entre los mismos vértices. Los grafos simples se utilizan cuando solo se necesita representar una relación entre dos entidades sin considerar múltiples conexiones entre ellas.

Por otro lado, en un grafo multígrafo (Figura 5, Derecha), se permiten múltiples aristas entre los mismos vértices. Los grafos multígrafos se utilizan para representar situaciones en las que se pueden tener múltiples relaciones o interacciones entre las mismas entidades.



Grafo simple
Una arista une 2 vértices
específicos.



Multígrafo
Más de una arista entre 2
vértices.

Figura 5 Grafo simple vs multígrafo. (Godsil & Royle, 2001)

4. Grafos cíclicos vs. Grafos acíclicos: Un grafo cíclico (Figura 6, izquierda) contiene al menos un ciclo, que es una secuencia de aristas que forman un circuito cerrado. Esto significa que se puede seguir un recorrido a lo largo de las aristas y volver al mismo vértice de partida. Los grafos cíclicos se utilizan para modelar situaciones en las que existen bucles o repeticiones en las relaciones entre los vértices. En contraste, un grafo acíclico (Figura 6, derecha) no contiene ciclos. Los grafos acíclicos se utilizan para representar situaciones en las que las relaciones son acíclicas o no se permiten bucles.

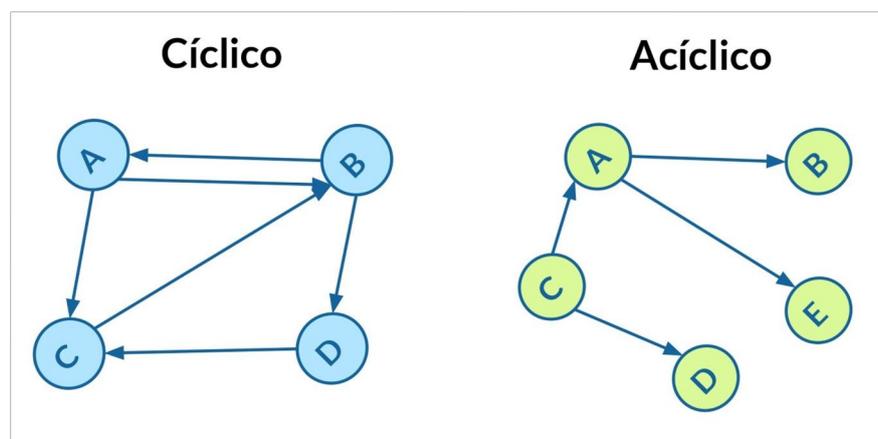


Figura 6 Grafo cíclico vs acíclico.

5. Grafos conexos vs. Grafos no conexos: Un grafo conexo (Figura 7, izquierda) es aquel en el que existe al menos un camino entre cualquier par de vértices. Esto significa que se puede llegar desde cualquier vértice a cualquier otro vértice a través de una secuencia de aristas. Los grafos conexos se utilizan para representar sistemas o redes que están completamente interconectados. En cambio, un grafo no conexo (Figura 7, derecha) tiene al menos dos vértices que no están conectados entre sí. Los grafos no conexos se utilizan para representar sistemas o redes fragmentados o no completamente conectados.

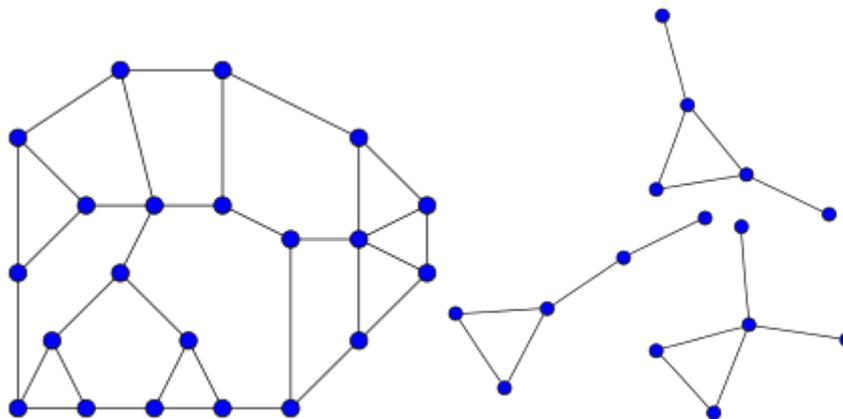


Figura 7 Grafo conexo vs grafo desconexo. (Godsil & Royle, 2001)

Las Redes de Distribución de Agua (RDA) pueden ser consideradas como grafos conexos, y su estructura puede variar desde redes malladas (cíclicas) hasta redes ramificadas (acíclicas). Estas redes están dirigidas por diversas características que pueden ser ponderadas, como caudal, longitud, diámetro o coeficiente de rugosidad de las tuberías. Estos conocimientos fundamentales han servido como base para el desarrollo de los algoritmos descritos en este trabajo. Estos algoritmos permiten la creación de árboles generadores ponderados según el criterio de interés en cada momento, aseguran que el flujo de agua no siga una dirección opuesta durante la simulación y facilitan la identificación de las líneas que forman subgrafos dentro de la RDA. Estos avances son esenciales para lograr simplificaciones efectivas y precisas de las RDA, lo que contribuye significativamente a la optimización y el manejo eficiente de estos sistemas de distribución de agua.

2.6. ALGORITMOS DE LA TEORÍA DE GRAFOS

Dentro de la teoría de grafos, existen varios algoritmos fundamentales que permiten realizar diversas operaciones y análisis. Estos algoritmos son herramientas clave para comprender la estructura y las propiedades de los grafos, así como para resolver problemas específicos relacionados con ellos.

Uno de los algoritmos más conocidos es el algoritmo de búsqueda en profundidad (DFS, por sus siglas en inglés), El algoritmo de búsqueda en profundidad (Everitt & Hutter, 2015) es utilizado para recorrer un grafo de manera exhaustiva, explorando todos los nodos y aristas posibles. Comienza en un nodo inicial y explora todos sus nodos vecinos de manera recursiva, antes de retroceder y explorar los nodos vecinos no visitados. Este proceso continúa hasta que todos los nodos del grafo hayan sido visitados. El algoritmo de DFS es útil para determinar la conectividad del grafo, encontrar ciclos y componentes conexos, así como para realizar otras tareas de exploración

Otro algoritmo importante es el algoritmo de búsqueda en amplitud (BFS, por sus siglas en inglés) (Everitt & Hutter, 2015), El algoritmo de búsqueda en amplitud es utilizado para recorrer un grafo de manera sistemática, explorando todos los nodos vecinos antes de pasar a los nodos más distantes. Comienza en un nodo inicial y explora todos sus nodos vecinos, luego se mueve a los nodos vecinos de esos nodos y así sucesivamente. El proceso continúa hasta que se hayan visitado todos los nodos alcanzables desde el nodo inicial. El algoritmo de BFS es útil para encontrar el camino más corto entre dos nodos, identificar componentes conexos y realizar otras tareas de búsqueda.

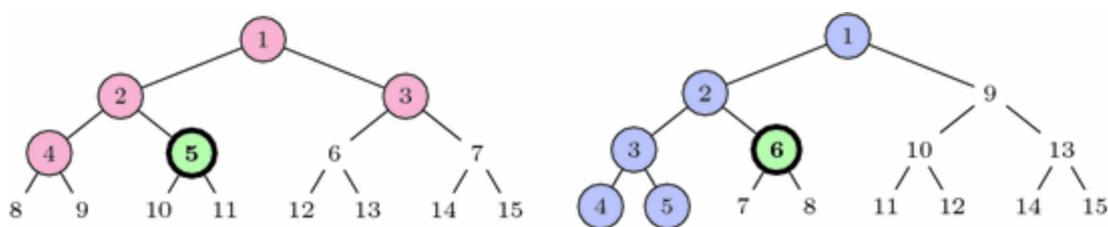


Figura 8 Búsqueda en amplitud (Izquierda) y búsqueda en profundidad (Derecha) en un árbol. (Everitt & Hutter, 2015)

En la Figura 8, los números presentados indican el orden en el que se realizan los recorridos donde ambos tienen como objetivo el vértice señalado en verde. Se puede apreciar cómo los nodos marcados con círculos son explorados antes de alcanzar el objetivo en ambos métodos. Sin embargo, es evidente que BFS y DFS se adentran en diferentes secciones del árbol en su búsqueda.

Es crucial destacar que esta variación en la exploración puede tener un impacto significativo en el rendimiento de la búsqueda, especialmente en árboles más extensos. Dependiendo de la estructura del árbol y la ubicación del objetivo, BFS y DFS pueden revelar diferencias sustanciales en cuanto a la eficiencia y el tiempo necesario para alcanzar el objetivo deseado. En la práctica, comprender cómo estos dos enfoques de búsqueda se comportan y cómo exploran diferentes partes del árbol es fundamental para seleccionar el método más adecuado según el contexto y los objetivos específicos de la búsqueda.

Además, la teoría de grafos incluye algoritmos para encontrar árboles de expansión mínima, que son subgrafos de un grafo original que contienen todos los nodos y minimizan la suma de los pesos de las aristas. Estos algoritmos son cruciales en problemas de optimización, como el problema del árbol de expansión mínima y el problema del viajante de comercio. Alguno de estos algoritmos son el algoritmo de Kruskal (Erniyati & Citra, 2019) para encontrar el árbol de expansión mínima, y el algoritmo de Floyd-Warshall (Nugraha & Wulandari, 2021) para encontrar todos los caminos más cortos entre todos los pares de nodos en un grafo ponderado.

Pero para el presente trabajo los considerados más importantes además de DFS y BFS son el algoritmo de Prim y el algoritmo de Dijkstra (Lammich & Nipkow, 2022). Son dos algoritmos diferentes utilizados en la teoría de grafos, cada uno con su propio propósito y aplicaciones específicas. A continuación, se presentan las principales diferencias entre ambos algoritmos:

1. Objetivo:

El objetivo del algoritmo de Prim es encontrar un árbol de expansión mínima en un grafo ponderado y conexo. El árbol de expansión mínima es un subconjunto de aristas que conecta todos los nodos del grafo con la menor suma de pesos posibles. El objetivo del algoritmo de Dijkstra es encontrar el camino más corto desde un nodo fuente a todos los demás nodos en un grafo ponderado. El camino más corto se refiere a la ruta con la menor suma de pesos entre los nodos.

2. Tipo de grafo:

El algoritmo de Prim está diseñado para grafos ponderados y conexos. Se utiliza para encontrar un árbol de expansión mínima en un grafo donde todas las aristas tienen un peso asociado. El algoritmo de Dijkstra también se utiliza en grafos ponderados, pero no necesita que el grafo sea conexo. Puede encontrar los caminos más cortos incluso en grafos no conexos.

3. Proceso de construcción:

El algoritmo de Prim construye gradualmente un árbol de expansión mínima agregando la arista de menor peso que conecta un nodo del árbol con un nodo fuera del árbol. Continúa agregando aristas hasta que todos los nodos estén incluidos en el árbol de expansión mínima. El algoritmo de Dijkstra funciona mediante la exploración de los nodos en función de sus distancias mínimas conocidas desde el nodo fuente. Comienza asignando una distancia infinita a todos los nodos, excepto al nodo fuente, y selecciona el nodo con la distancia mínima para expandirlo y actualizar las distancias mínimas de sus nodos vecinos.

4. Propósito de las distancias:

En el algoritmo de Prim, las distancias se utilizan para determinar qué arista se agrega al árbol de expansión mínima. La arista de menor peso que conecta un nodo del árbol con un nodo fuera del árbol se selecciona en cada paso. En el algoritmo de Dijkstra, las distancias se utilizan para determinar los caminos más cortos desde el nodo fuente a todos los demás nodos. Las distancias se actualizan continuamente a medida que se encuentran caminos más cortos a través de los nodos explorados.

En conclusión, el algoritmo de Prim se utiliza para encontrar un árbol de expansión mínima en un grafo ponderado y conexo, mientras que el algoritmo de Dijkstra se utiliza para encontrar los caminos más cortos desde un nodo fuente a todos los demás nodos en un grafo ponderado. La diferencia principal radica en el objetivo y el proceso de construcción de cada algoritmo, así como en el propósito de las distancias utilizadas en cada caso.

2.7. APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE GRAFOS A LOS MODELOS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

La teoría de grafos ha encontrado diversas aplicaciones en el campo de las redes de distribución de agua, siendo una herramienta efectiva para abordar diferentes aspectos de su diseño y optimización. Un ejemplo ilustrativo es el trabajo de Farias et al, (2021) quienes propusieron un método para el dimensionado de redes de distribución de agua al combinar los gradientes hidráulicos calculados mediante la ecuación de Hazen-Williams con simulaciones realizadas a través del software EPANET. En este enfoque, la teoría de grafos se integra para optimizar el dimensionado de la red.

En su estudio, los autores aplicaron esta metodología a cuatro redes distintas, logrando dimensionar las redes de manera que cumplieran con los requisitos mínimos establecidos por el usuario. Luego, llevaron a cabo una comparación técnica y económica entre su enfoque y otros métodos existentes. A pesar de que ambos métodos generaron valores similares de presión a lo largo de la red, el método propuesto por los autores se destacó al ofrecer un resultado económico más favorable.

Este ejemplo resalta cómo la combinación de la teoría de grafos con herramientas hidráulicas y simulaciones puede conducir a soluciones más eficientes y rentables en el diseño y dimensionado de redes de distribución de agua. Además, subraya la versatilidad de la teoría de grafos en el ámbito de la ingeniería civil y cómo puede contribuir significativamente a la mejora de la infraestructura de suministro de agua.

En cuanto a la detección de fugas en redes de distribución de agua, se ha propuesto una metodología innovadora por parte de Shekofteh et al, (2020) que combina la teoría de grafos y las redes neuronales. Esta metodología tiene como objetivo identificar y localizar de manera precisa los elementos de la red que presentan fugas. los autores. En primer lugar, realizan una descomposición de la red en dos grupos principales utilizando la teoría de grafos. Este enfoque permite segmentar la red en subconjuntos más manejables, lo que facilita la detección de fugas. Posteriormente, se utiliza un algoritmo de búsqueda en amplitud para analizar cada grupo y detectar los elementos de la red que presentan fugas. Es en esta etapa donde las redes neuronales entran en juego. Se utilizan modelos de aprendizaje automático basados en redes neuronales para

analizar los datos recopilados y clasificar los elementos como "fuga" o "sin fuga" como se aprecia en la Figura 9.

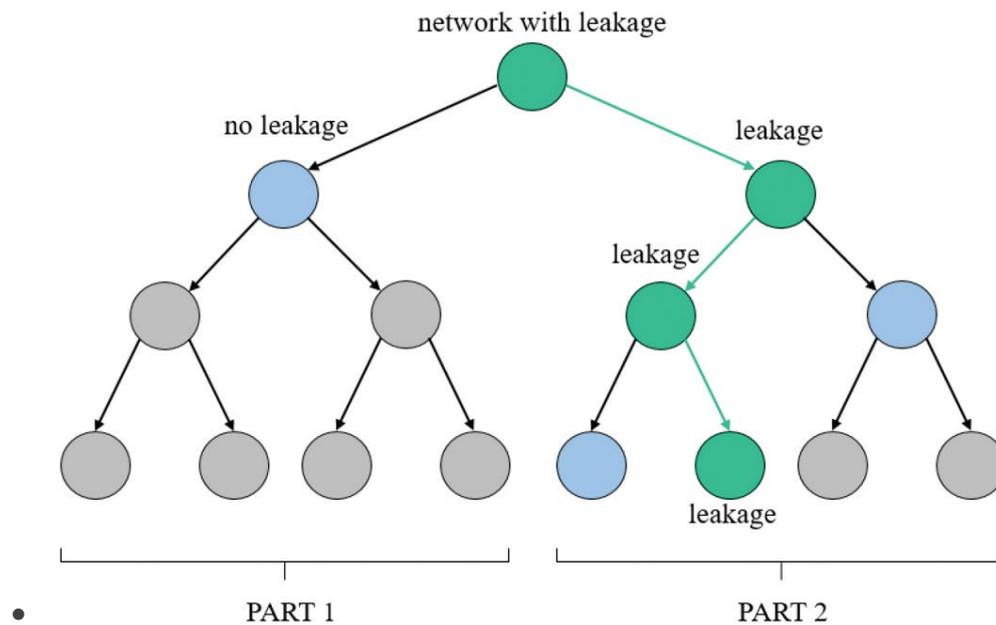


Figura 9 Algoritmo de detección de fugas.(Shekofteh et al., 2020)

En la Figura 9 se muestra la ruta de selección de la parte con fugas. Las partes azules están libres de fugas y el color verde indica las partes con fugas. Para identificar la ubicación de la fuga, se sigue la ruta verde con el algoritmo de BFS.

En el ámbito de las redes de distribución de agua potable, Meijer et al (2021), presentaron una metodología basada en la teoría de grafos para la identificación de elementos críticos. Esta metodología ofrece una alternativa prometedora al evitar la necesidad de realizar cálculos hidrodinámicos complejos en el modelo. En este estudio, los autores destacan que la topografía de la red es un factor determinante en la identificación de elementos críticos, en lugar de depender exclusivamente de la simulación hidráulica. Utilizando conceptos y técnicas de la teoría de grafos, se pueden identificar de manera efectiva los elementos que tienen un impacto significativo en el rendimiento y la operación de la red. Una de las principales ventajas de esta metodología es su capacidad para identificar no solo los elementos críticos de la red principal, sino también de sus ramificaciones y conexiones. Esto permite un análisis más completo y exhaustivo de la red de distribución de agua potable, lo que resulta en una mejor comprensión de los puntos vulnerables y de alto riesgo.

Con relación a la edad del agua, que representa el tiempo que tarda el agua en viajar a través de la red de distribución hasta llegar a los consumidores, existen ciertos desafíos debido a la priorización de mantener presiones bajas en la red. Esto se busca reducir el estrés físico en los componentes de la red y minimizar las pérdidas de agua por posibles fugas. Sin embargo, esta búsqueda de presiones bajas puede aumentar la edad del agua, lo cual se considera una indicación de baja calidad del agua. Por lo tanto, surge la necesidad de abordar simultáneamente la reducción de la edad del agua y la presión en el diseño y la gestión de las redes de distribución de agua. Para abordar este desafío Shmaya & Ostfeld (2022), proponen un algoritmo basado en la teoría de grafos para identificar ubicaciones óptimas para la implementación de válvulas reductoras de presión. Este algoritmo utiliza el software EPANET para la simulación y el análisis de la red, permitiendo evaluar los efectos de la ubicación de las válvulas en términos de reducción de la edad del agua y control de la presión en la red.

La teoría de grafos se utilizó como base para desarrollar un método de reconstrucción de datos en redes de distribución de agua con falta de información (Hajibabaei et al., 2023). Se aplicaron métricas de grafos y características de redes complejas para analizar la estructura y las propiedades de la red disponible, como los diámetros de las tuberías y sus conexiones con las tuberías vecinas. El enfoque se basó en el análisis de la topología de la red y la relación entre los diámetros conocidos y los diámetros faltantes de las tuberías. Simone, (2023) utilizó medidas de grafos para identificar patrones y características en los datos disponibles que permitieran inferir los valores faltantes de los diámetros de las tuberías. Estas medidas incluyeron la centralidad de los nodos y los bordes, la conectividad de la red y la estructura general de la red.

A través de un proceso sistemático, se crearon escenarios con información faltante sobre los diámetros de las tuberías y se reconstruyeron sucesivamente utilizando las características de grafos de los diámetros disponibles y las tuberías vecinas. Para validar el enfoque, se compararon las características estructurales (diámetros) e hidráulicas (presión) de las redes reconstruidas con los datos completos de la red de distribución de agua utilizada como caso de estudio. Los resultados mostraron que una parte significativa de los diámetros desconocidos pudo ser reconstruida con alta precisión hasta un 50% de datos faltantes. El enfoque basado en la teoría de grafos permitió identificar patrones y relaciones en la red existente para inferir los valores faltantes de manera efectiva.

La teoría de grafos no solo se ha utilizado en redes de agua potable, en redes de drenaje Simone, (2023) utilizó la teoría de grafos para abordar el problema de evaluar escenarios de falla de múltiples tuberías en redes de drenaje urbano. Se propuso un método novedoso basado en grafos para evaluar el impacto global de las inundaciones cuando ocurren diferentes combinaciones de fallas de tuberías. El método utiliza técnicas de grafos para encontrar las combinaciones de fallas más críticas y determinar el impacto de cada combinación en el sistema. Se demostró que el enfoque basado en grafos es más eficiente en términos de tiempo de cálculo en comparación con los métodos convencionales de modelado hidrodinámico. Además, se discutió un enfoque híbrido que combina el modelado hidrodinámico con el método de grafos, aprovechando la precisión del modelado hidrodinámico y la eficiencia computacional del método de grafos. Este estudio demuestra cómo la teoría de grafos puede ser aplicada de manera efectiva para abordar problemas complejos en la gestión y mantenimiento de las redes de drenaje urbano.

2.8. ALGORITMOS DE VALIDACIÓN PARA LA SIMPLIFICACIÓN DE RDA

Para validar una simplificación de redes de distribución de agua (RDA), es fundamental emplear métodos precisos y efectivos que evalúen la calidad de la simplificación realizada. Existen diversas estrategias y métricas para llevar a cabo esta validación, cada una con su enfoque particular. En este apartado, se explorarán los Algoritmos de Validación para la Simplificación de RDA, que permiten comparar los resultados entre la red original y la simplificada. Estos métodos brindan una visión clara de la calidad y precisión de la simplificación, permitiendo a los usuarios tomar decisiones informadas en función de sus objetivos y requisitos específicos.

Con el fin de evitar simplificaciones que puedan generar cambios mayores de los deseados por el usuario en la red, se realiza una comparativa de los valores de caudal y presión para las tuberías y nudos de control, respectivamente, entre la red original y la red simplificada. La metodología permite al usuario la libertad de elegir las metodologías de validación que prefiera utilizar, o si así lo desea, una combinación de diferentes métodos.

Estas metodologías de validación pueden incluir técnicas de análisis numérico o simulaciones hidráulicas, en las cuales se comparan los resultados obtenidos en la red original y en la red simplificada. Algunos ejemplos de métodos de validación comunes son el análisis de errores relativos, el cálculo de coeficientes de correlación, el estudio de la diferencia de presiones y caudales en puntos críticos, entre otros.

La elección de las metodologías de validación dependerá de los objetivos y requisitos específicos del proyecto. Es importante destacar que el usuario tiene la capacidad de adaptar y personalizar las metodologías de validación según sus necesidades y criterios de evaluación. De esta manera, se garantiza que la simplificación de la red se ajuste a los estándares y expectativas establecidos por el usuario.

En el apartado de los casos de estudio se presentarán los resultados obtenidos en la misma red, utilizando los mismos elementos de control. Se realizarán diferentes validaciones, como el índice de Nash y el RMSE (Error Cuadrático Medio de la Raíz). Estas métricas permitirán evaluar la precisión y el ajuste de los resultados de la red simplificada en comparación con la red original.

El índice de Nash es una medida que compara la discrepancia entre los valores observados y los valores predichos, siendo 1 el valor óptimo que indica un ajuste perfecto. El RMSE es una medida que evalúa la diferencia entre los valores observados y los valores predichos, proporcionando una estimación de la precisión del modelo. La combinación de ambas métricas brinda una evaluación más completa y detallada de la calidad de la simplificación de la red. Estas validaciones permitirán al usuario tener una visión clara de los resultados obtenidos y tomar decisiones informadas sobre la calidad y eficacia de la simplificación de la red en función de sus objetivos y requisitos específicos.

2.8.1. ERROR MEDIO CUADRÁTICO

El error medio cuadrático (MSE, por sus siglas en inglés) Gupta & Kling, (2011) lo definen como una medida estadística que cuantifica el promedio de los errores al cuadrado entre los valores predichos (o resultantes de una red simplificada) y los valores observados en la red original. El MSE se calcula mediante la diferencia al cuadrado entre cada valor predicho y su correspondiente valor observado en la red original. Luego, se promedia estos errores cuadráticos para obtener el MSE. Esta medida es comúnmente utilizada en el análisis de modelos de predicción y en el ajuste de datos, ya que proporciona una forma de evaluar qué tan bien se ajustan los valores predichos a los valores reales.

Un MSE más bajo indica que los valores predichos están más cercanos a los valores observados, lo que implica una mejor calidad del modelo o de la red simplificada en términos de ajuste y precisión. Por otro lado, un MSE más alto indica que los errores entre los valores predichos y

observados son mayores, lo que sugiere que el modelo o la red simplificada pueden tener un desempeño deficiente en la reproducción de los valores reales.

El MSE se utiliza comúnmente en diversas áreas, como la estadística, el aprendizaje automático y la optimización, para evaluar la calidad de los modelos y comparar diferentes enfoques o algoritmos. Permite cuantificar la discrepancia entre las predicciones y los valores observados, lo que proporciona información valiosa para la mejora y ajuste de los modelos o redes simplificadas.

El MSE viene dado por la siguiente expresión:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{i_o} - X_{i_s})^2 \quad (2)$$

donde:

- X_{i_o} es el valor de presión o caudal observado en el modelo original.
- X_{i_s} es el valor de presión o caudal observado en el modelo simplificado
- I es el instante de tiempo del modelo.
- n es el número de datos, en este caso de instantes de tiempo.

2.8.2. RAÍZ DEL ERROR CUADRÁTICO MEDIO

El Error Medio Cuadrático de la Raíz (RMSE) es una métrica ampliamente utilizada para evaluar la precisión de modelos de predicción en diversos campos, incluyendo la ingeniería, las ciencias de datos y la investigación. El RMSE proporciona una medida cuantitativa de la discrepancia entre los valores predichos por un modelo y los valores reales observados en un conjunto de datos. Al tomar la raíz cuadrada del promedio de los errores al cuadrado, el RMSE nos brinda una estimación del error típico de las predicciones del modelo. Cuanto menor sea el valor del RMSE, mayor será la precisión del modelo en la predicción de los valores reales. El RMSE se utiliza ampliamente en la evaluación y comparación de diferentes modelos, permitiendo a los investigadores y profesionales determinar la efectividad de sus enfoques y tomar decisiones informadas basadas en la calidad de las predicciones obtenidas (Hodson, 2022). Este viene dado por la expresión:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - Y'_i)^2} \quad (3)$$

donde:

- n es el número de elementos considerados para el cálculo del RMSE, en nuestro caso será la lista de elementos de control.
- Y_i es el valor actual del nudo Y en el instante i .
- Y'_i es el valor actual del nudo Y luego de la simplificación en el instante i .
- n es el número de instantes.

El rango de valores que puede tomar el RMSE varía desde 0 hasta $+\infty$. Un valor de 0 en el RMSE indica una coincidencia perfecta entre los valores observados en la red original y los valores obtenidos en la red simplificada. Esto significa que el modelo de predicción es capaz de reproducir de manera precisa los datos reales.

A medida que el valor del RMSE aumenta, indica un mayor error en las predicciones del modelo en comparación con los valores observados. Valores más altos del RMSE señalan un menor ajuste y una mayor discrepancia entre los valores predichos y los valores reales.

Es importante tener en cuenta que el RMSE se expresa en las mismas unidades que los valores que se están evaluando. Esto facilita la interpretación del error en la misma escala de los datos originales. En general, se busca minimizar el RMSE, ya que valores más bajos indican una mayor precisión y un mejor ajuste del modelo a los datos observados.

Sin embargo, es importante considerar el contexto y los objetivos del estudio al interpretar el RMSE. Puede haber situaciones en las que un RMSE más alto sea aceptable.

2.8.3. ÍNDICE DE NASH-SUTCLIFFE

El índice de Nash (Cabrera, 2012) es una medida estadística ampliamente utilizada para evaluar el rendimiento de los modelos hidrológicos e hidráulicos. Su objetivo principal es comparar los

valores predichos por un modelo con los valores observados, proporcionando una medida de qué tan bien se ajusta el modelo a los datos reales. El rango del índice de Nash varía de $-\infty$ a 1, donde un valor de 1 indica una coincidencia perfecta entre las predicciones y los valores observados.

La fórmula para calcular el índice de Nash es la siguiente:

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (4)$$

donde:

- O_i representa los valores observados,
- S_i representa los valores obtenidos luego de la simplificación
- \bar{O} representa la media de los valores observados en el modelo original.

El resultado del índice de Nash refleja la calidad de las predicciones del modelo. Un valor de 1 indica una predicción perfecta, donde los valores predichos coinciden exactamente con los observados. Un valor de 0 indica que el modelo no se ajusta a los datos, mientras que valores negativos indican que el modelo es peor que simplemente usar la media de los valores observados.

De acuerdo con Cabrera, (2012) los rangos para la interpretación de los resultados obtenidos por el índice de Nash-Sutcliffe vienen dados en la Tabla 1.

Tabla 1. interpretación de valores del índice de Nash.

Nash	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2-0.4	Satisfactorio
0.4-0.6	Bueno
0.6-0.8	Muy bueno
>0.8	Excelente

2.9. MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN DE LA SIMPLIFICACIÓN

Un método de optimización es un procedimiento matemático utilizado para encontrar la mejor solución posible a un problema de optimización, ya sea maximizando o minimizando una función objetivo. Estos métodos son ampliamente utilizados en diversas áreas, como la ciencia, la ingeniería, la economía y la inteligencia artificial, para abordar problemas de toma de decisiones y mejorar el rendimiento de sistemas complejos.

El óptimo de una función se refiere al punto donde la curva de la función es plana. Matemáticamente, esto se puede determinar analizando las derivadas de la función. Para encontrar el óptimo, se busca el valor de x donde la derivada de la función, $f'(x)$, es igual a cero. Esto indica que en ese punto la función alcanza un extremo local, ya sea un mínimo o un máximo.

Además, la segunda derivada de la función, $f''(x)$, también es importante para determinar el tipo de óptimo. Si la segunda derivada es negativa, es decir, $f''(x) < 0$, entonces el punto corresponde a un máximo local. Por otro lado, si la segunda derivada es positiva, es decir, $f''(x) > 0$, entonces el punto corresponde a un mínimo local (Chapra et al., 2008).

Estos conceptos son fundamentales en el análisis de funciones y la optimización de problemas matemáticos. Al encontrar los puntos donde la derivada es cero y analizar la segunda derivada, podemos identificar los posibles óptimos de una función y determinar si son mínimos o máximos locales. Esto es de gran importancia en diversos campos, como la economía, la física y la ingeniería, donde se busca maximizar o minimizar una determinada variable o función.

Si se desea encontrar el óptimo de una función y no se conoce su forma analítica, una estrategia sugerida es derivar la función para obtener su derivada y luego buscar las raíces de esta derivada. En otras palabras, se buscan los puntos donde la derivada de la función es igual a cero: $f'(x) = 0$. Al encontrar estos puntos, se pueden identificar posibles óptimos.

Sin embargo, en la práctica, la obtención de la derivada analítica de la función puede ser complicada o incluso imposible. En estos casos, se recurre a métodos de aproximación para la mejora de la función objetivo.

Los problemas de optimización se pueden clasificar en unidimensionales y multidimensionales, encontrados en la Tabla 2. Los problemas unidimensionales son aquellos en los que la función objetivo depende de una única variable independiente. En este caso, la búsqueda del óptimo

implica ascender o descender por picos y valles unidimensionales. Por otro lado, los problemas multidimensionales son aquellos en los que la función objetivo depende de dos o más variables independientes. En este caso, la optimización se visualiza como una búsqueda de picos y valles en un espacio multidimensional. A diferencia de los problemas unidimensionales, en los problemas multidimensionales no estamos limitados a movernos en una sola dirección. En cambio, se examina la topografía del espacio de variables para alcanzar eficientemente el objetivo deseado.

En el ámbito de este trabajo se necesitará de una optimización multidimensional, se llevará a cabo la optimización en el algoritmo de múltiples entradas y/o salidas, donde las entradas y salidas del bloque serán sustituidas por válvulas, estas deben representar la pérdida de carga de las tuberías a sustituir y además de las que se encuentran dentro del bloque de simplificación mientras se intenta que la distribución de caudales sea la misma que en la red original.

En la Tabla 2 se encuentran los diferentes métodos de optimización existentes para los diferentes tipos de problemas y sus restricciones:

Tabla 2 Clasificación de los métodos de optimización (Chapra et al., 2008)

Problema	Restricciones	Tipo	Métodos	
Unidimensional	No	No requiere la derivada de la función	Sección dorada Interpolación cuadrática	
		Requiere la derivada de la función	Método de Newton	
Multidimensional No lineal	No	No requiere la derivada de la función	Método Simplex	
			Algoritmo de Hooke y Jeeves	
			Método de Rosenbrock	
			Método de las direcciones conjugadas	
		Requiere la derivada de la función	Métodos de máximo descenso	
			Método del gradiente conjugado	
	Método de Newton			
	Método de Marquardt			
	Si			Método cuasi Newton
				Método de penalización exterior
				Método de penalización interior (barrera)
				Métodos de proyección de gradiente
Método de gradiente reducido generalizado				
Programación lineal sucesiva				
Programación cuadrática sucesiva				
Multidimensional Lineal	Si		Método gráfico	
			Método simplex	

2.9.1. HOOKE & JEEVES

Se ha decidido optar por uno de los métodos de optimización ampliamente conocido y utilizado el método de Hooke and Jeeves. Este método, también conocido como el algoritmo de exploración directa, fue desarrollado por Robert Hooke y Thomas A. Jeeves en la década de 1960.

El método de Hooke and Jeeves (India et al., 2019) es un enfoque heurístico que se basa en la exploración sistemática del espacio de búsqueda en busca de la solución óptima. La idea fundamental detrás del método es dividir el espacio de búsqueda en regiones y explorar cada una de ellas para encontrar la dirección que mejora la función objetivo. A medida que se explora el espacio de búsqueda, el método ajusta y actualiza iterativamente la solución en función de los resultados obtenidos.

El algoritmo de Hooke and Jeeves se destaca por ser un método sin restricciones, es decir, no requiere información sobre las restricciones del problema. Además, este método no utiliza derivadas de la función objetivo, lo que lo convierte en una opción atractiva cuando la función objetivo es difícil de derivar o no se encuentra disponible de manera explícita.

El método de Hooke and Jeeves ha demostrado ser eficaz en una amplia gama de aplicaciones, como optimización de funciones no lineales, diseño de sistemas, ajuste de modelos y análisis de datos. A lo largo de los años, ha sido objeto de varias mejoras y extensiones, lo que ha permitido su adaptación a diferentes problemas y contextos.

El método de Hooke and Jeeves es un valioso enfoque de optimización que ha demostrado su utilidad en la resolución de problemas complejos. Su enfoque heurístico y su capacidad para funcionar sin información derivada lo convierten en una opción popular para abordar problemas donde otras técnicas pueden ser limitadas.

Para el desarrollo del método de Hooke and Jeeves (Figura 10) se debe llevar a cabo los siguientes pasos:

1. Paso inicial: Se selecciona un punto inicial en el espacio de búsqueda, que representa una solución inicial para el problema de optimización.
2. Exploración inicial: Se realiza una exploración inicial en el vecindario del punto inicial utilizando un patrón de exploración predefinido. Este patrón determina la dirección y la distancia de los pasos de exploración.
3. Evaluación de la función objetivo: Se evalúa el valor de la función objetivo en cada punto de exploración. Se busca el punto que minimiza o maximiza la función objetivo, dependiendo del tipo de optimización requerida.

4. Actualización de la solución: Si se encuentra un punto mejor que el punto inicial, se actualiza la solución actual con este nuevo punto.
5. Refinamiento de la solución: Se realiza una búsqueda más precisa alrededor del punto encontrado en el paso anterior. Se reducen gradualmente los pasos de exploración y se continúa buscando mejoras en la solución.
6. Convergencia: El algoritmo continúa refinando la solución hasta que ya no se encuentren mejoras significativas o hasta que se cumpla un criterio de convergencia predefinido. Este criterio puede ser un número máximo de iteraciones, una tolerancia de mejora o cualquier otra condición de parada especificada por el usuario.

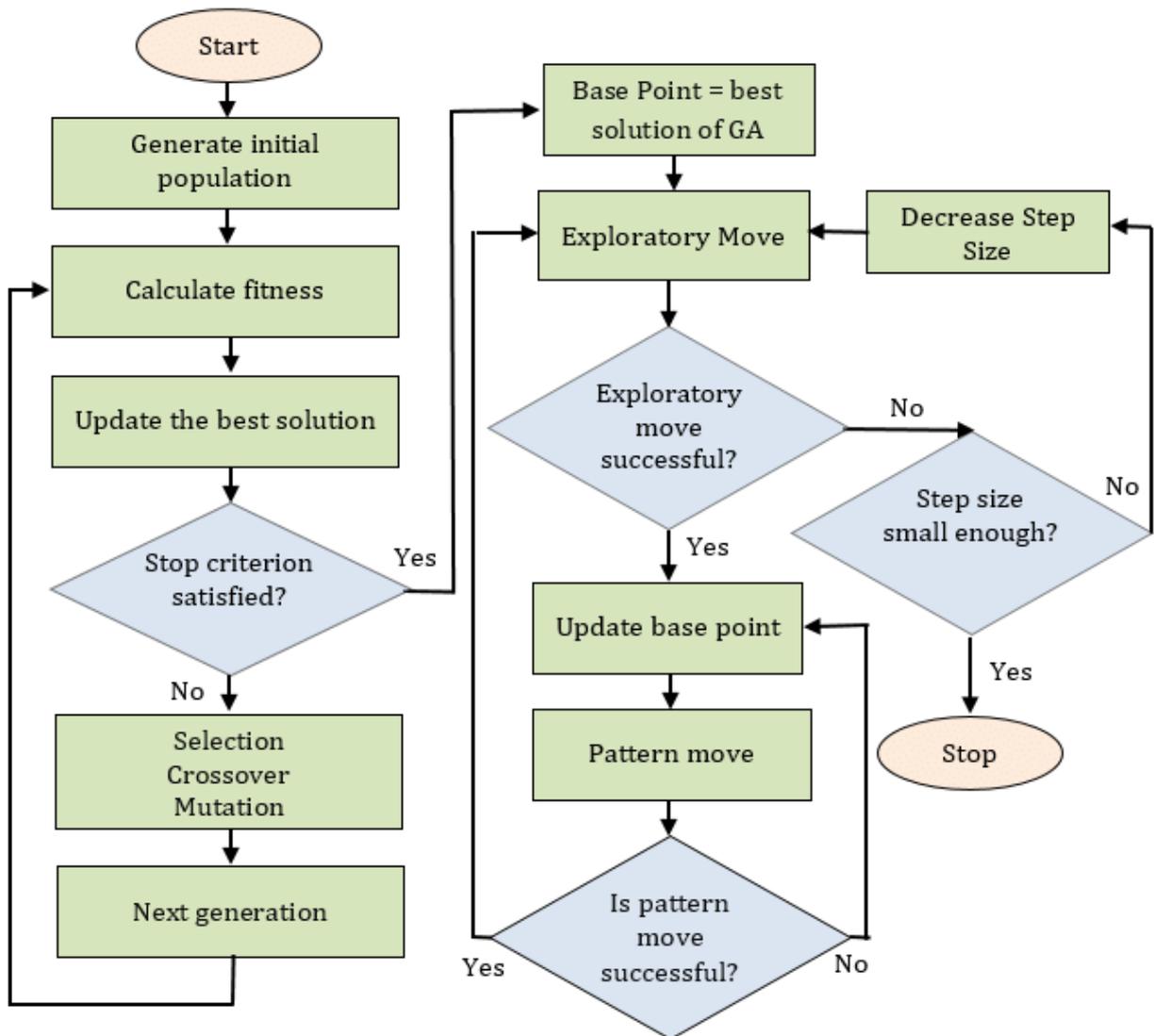


Figura 10. Diagrama de flujo para el algoritmo de Hooke & Jeeves(Chaudhry et al., 2018)

2.10. EFECTOS DE LA SIMPLIFICACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

Aunque queda fuera del caso de estudio, ya que está basado en comparativa puramente hidráulica, cabe destacar que los principales efectos negativos de la simplificación de redes de distribución de agua vienen en la parte de la calidad. Bahadur et al, (2008) realizaron un estudio de como los diferentes grados de simplificación de una red llevan a diferentes resultados en la calidad, Los resultados muestran que la velocidad, la edad del agua, las demandas en cada nodo y la densidad de población varían con diferentes niveles del modelo esquelético. La variación en la velocidad afecta el tiempo de llegada de los contaminantes y su concentración. El aumento en la densidad de población, debido a la asignación de una población determinada a menos nodos en el modelo, a su vez, afecta la evaluación de las consecuencias de los contaminantes.

En el contexto energético de las RDA, se reconoce la importancia crucial de la energía para su operación eficiente, especialmente en un contexto de aumento de los precios energéticos. Es fundamental comprender el flujo de energía en estas redes, incluso cuando se utilizan modelos simplificados que permiten un manejo más sencillo y menor tiempo de cálculo. Sin embargo, es fundamental que estos modelos simplificados representen con precisión el escenario real de la red, considerando tanto la demanda como la hidráulica. La falta de una representación precisa puede llevar a decisiones erróneas en el diseño y la operación, incluyendo el consumo de energía y la presión de suministro.

Pasha et al. (2023), presentan una investigación sobre cómo varía el flujo de energía en una RDA en función de la extensión de la red simplificada. Se mantiene constante la demanda total de la red y se analiza cómo cambian el consumo de energía en la estación de bombeo, la pérdida de energía en las tuberías y el almacenamiento de energía en el tanque a medida que se modifica el tamaño de la red simplificada. Para ello, se desarrolla un modelo de balance de energía para cada modelo simplificado, lo que permite observar el impacto en el flujo de energía en una serie de modelos. Además, se consideran dos tipos de redes: sistemas de distribución de agua en rama y en bucle, y se aplican estos análisis a dos redes hipotéticas de la literatura. Los resultados muestran que la simplificación afecta el patrón de flujo en el sistema en bucle más que en el sistema en rama, lo que provoca una mayor variación en la velocidad promedio del sistema y una mayor pérdida de energía por fricción en el sistema en bucle. Manteniendo constante la demanda total del sistema, se encontró que la variación en el consumo de energía de bombeo de una red esquelética a otra es mínima para ambos tipos de redes. La energía adicional necesaria para compensar la mayor pérdida

de energía por fricción en el sistema en bucle proviene del tanque. El consumo y pérdida de energía por unidad de demanda por nodo en el sistema en rama se encontró que es casi lineal, mientras que en el sistema en bucle es no lineal.

3. METODOLOGÍA DE SIMPLIFICACIÓN DE REDES

3.1. INTRODUCCIÓN

Tras realizar un análisis exhaustivo de las investigaciones existentes sobre la simplificación de las RDA se ha llegado a la conclusión de que no existe un enfoque estandarizado que sea aplicable de manera efectiva en redes con diversas topologías y características hidráulicas. Por lo tanto, se reafirma el objetivo principal de este trabajo, que es desarrollar algoritmos simples, independientes y automáticos capaces de adaptarse a las necesidades específicas del usuario y a las particularidades de cada RDA.

El enfoque propuesto se basa en la creación de algoritmos que puedan ser utilizados de manera conjunta, brindando soluciones integrales y eficientes para la simplificación de las RDA. Estos algoritmos se diseñarán de forma flexible, permitiendo su adaptación a diferentes contextos y requisitos. Se busca proporcionar herramientas automatizadas que faciliten el proceso de simplificación, sin comprometer la precisión y el comportamiento hidráulico de la red.

La combinación de estos algoritmos permitirá abordar los desafíos asociados con la simplificación de las RDA y ofrecer soluciones prácticas y efectivas. Se busca superar las limitaciones existentes en los enfoques actuales y proporcionar una metodología que pueda ser aplicada de manera eficiente en una amplia variedad de redes de distribución de agua.

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar algoritmos simples, independientes y automáticos para la simplificación de las RDA. Estos algoritmos serán diseñados de manera flexible para adaptarse a las necesidades del usuario y a las particularidades de cada red. La combinación de estos algoritmos proporcionará soluciones eficientes, superando las limitaciones de los enfoques actuales y facilitando el proceso de simplificación de las redes de distribución de agua.

3.2. PROTOCOLO DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

La herramienta desarrollada en este estudio para la simplificación de redes se basa en un archivo INP generado por el software EPANET. A partir de este archivo, se extraen los datos iniciales que describen las características de cada elemento de la red. Luego se realiza un cálculo hidráulico inicial utilizando estos datos y se registran los valores de presión y flujo en los puntos de control

definidos. Estos valores se utilizan posteriormente para asegurar que las simplificaciones propuestas no difieran significativamente de los valores originales, dentro del margen de error permitido establecido por el usuario.

En este estudio, se utiliza el término "escenario de actuación" para referirse a un conjunto de condiciones operativas que se emplean en el modelo. El software EPANET permite almacenar múltiples escenarios de actuación, lo cual es relevante para la metodología implementada en este trabajo. Dado que los datos iniciales se mantienen constantes y no pueden modificarse durante el proceso de simplificación, es posible obtener diferentes simplificaciones al realizar cambios en el escenario de actuación. Estos cambios se describirán con más detalle al presentar los resultados obtenidos mediante los diferentes algoritmos utilizados.

El proceso integral de simplificación se desglosa en una serie de pasos claramente definidos, tal como se ilustra en la Figura 11. En esta representación gráfica, se evidencia la secuencia iterativa en la que se emplean los algoritmos de simplificación preseleccionados por el usuario. En cada iteración, se aplican los cambios tanto topológicos como en los valores equivalentes en la red, con el objetivo de lograr la simplificación deseada.

Un componente crítico de este proceso es la verificación del impacto generado por los cambios implementados. Esta evaluación se centra en la comparación de los resultados obtenidos con los criterios previamente establecidos, con la finalidad de garantizar que los cambios realizados no resulten en un error que exceda el umbral definido.

Este enfoque iterativo asegura que cada modificación sea sometida a una revisión minuciosa y sistemática, lo que permite ajustar los cambios y mantener la coherencia y funcionalidad de la red simplificada en relación con la red original. A través de este proceso iterativo y controlado, se logra una simplificación efectiva y precisa, que garantiza tanto la eficiencia como la validez de la representación simplificada de la red de distribución de agua.

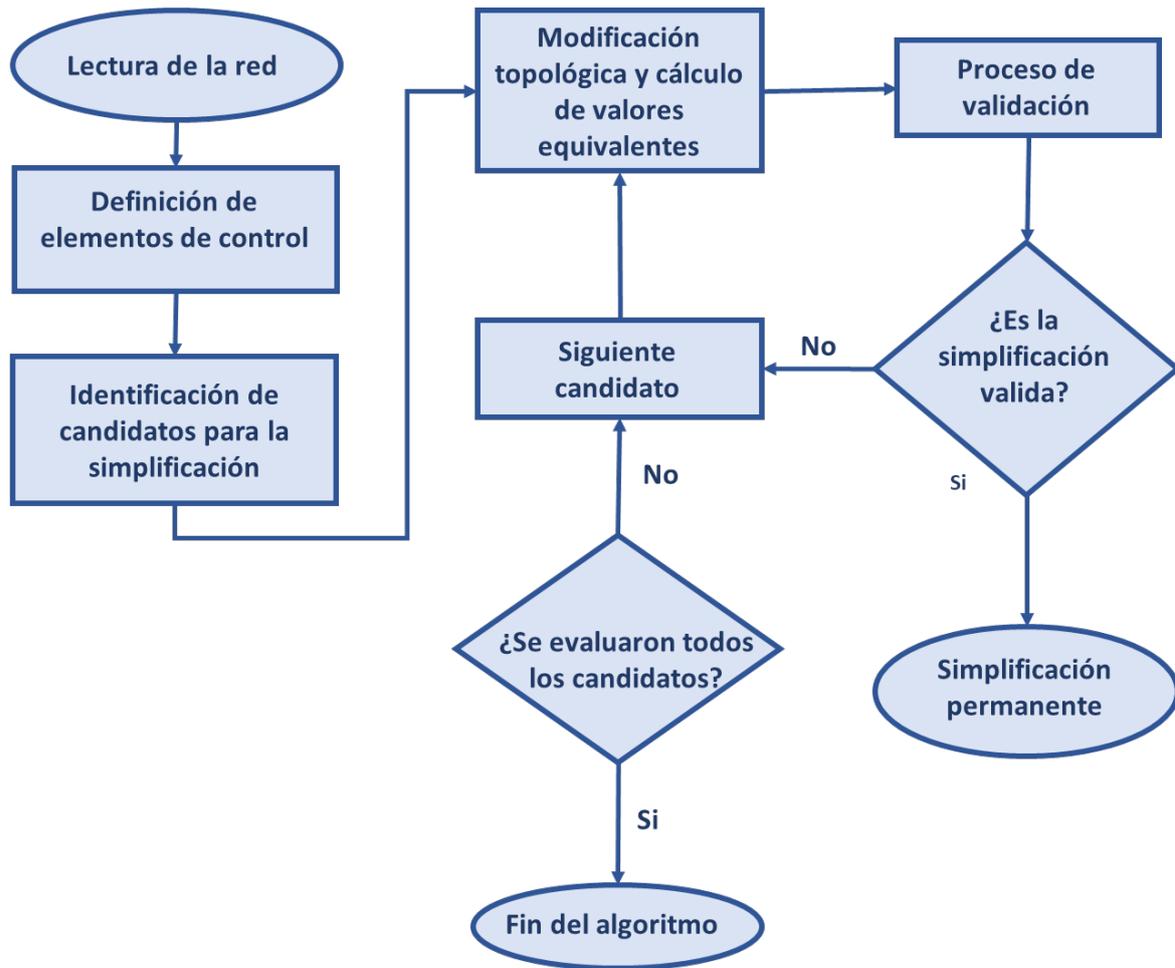


Figura 11 Diagrama de flujo para el proceso de simplificación y validación.

3.3. ALGORITMOS DE SIMPLIFICACIÓN INICIALES

Sin duda, uno de los desafíos más apremiantes en la gestión de RDA es encontrar un equilibrio entre la precisión en la representación de la red y la eficiencia computacional en su análisis. La complejidad inherente de estas redes, con numerosos nodos y tuberías interconectadas, a menudo conduce a modelos matemáticos extremadamente detallados que pueden resultar computacionalmente costosos y difíciles de interpretar.

Este apartado se enfoca en cuatro aspectos críticos de la simplificación de RDA: las tuberías en serie, las tuberías paralelas, nudos terminales y los nudos cercanos. Estos elementos representan desafíos específicos en la simplificación de la red y requieren enfoques distintos. Los algoritmos desarrollados aquí se basan en una combinación de conceptos hidráulicos y teoría de grafos para lograr simplificaciones efectivas y precisas. Con estos algoritmos, los usuarios tienen la capacidad

de simplificar su RDA de manera adaptable, manteniendo la calidad de representación necesaria para sus objetivos específicos.

A lo largo de los siguientes apartados, se explorarán estos algoritmos en detalle, destacando sus características únicas y su aplicación en la simplificación de RDA. Estos algoritmos representan un paso significativo hacia la estandarización y la eficiencia en la gestión de RDA, contribuyendo al desarrollo sostenible de los sistemas de abastecimiento de agua.

3.3.1. SIMPLIFICACIÓN DE TUBERÍAS PARALELAS

En el contexto de la metodología propuesta, el término “tuberías paralelas” se utiliza para hacer referencia a los conductos que comparten la misma trayectoria y se extienden en la misma dirección, al estar dispuestos uno al lado del otro. Se considera que dos o más tuberías son paralelas cuando comparten el mismo par de nodos; es decir, cuando tienen los mismos puntos de inicio y fin en su recorrido.

Además de compartir el mismo par de nodos, las tuberías paralelas deben cumplir ciertos criterios que garantizan la conservación de la similitud hidráulica entre el modelo simplificado y el modelo original. Estos criterios son los siguientes:

- Deben ser tuberías propiamente dichas. En el software Epanet, se considera 'líneas' no solo a las tuberías, sino también a cualquier tipo de válvula o grupo de bombeo. Para preservar la similitud hidráulica, nos centramos únicamente en las tuberías, asumiendo que si existen bombas o válvulas en el modelo es debido a que eran necesarias para este.
- No deben ser elementos de control. Dado que en estos elementos se realiza la comparativa para la validación, no se deben modificar sus propiedades físicas. Es importante mantener intactos estos elementos para asegurar la coherencia y confiabilidad del modelo simplificado.

Al considerar estos criterios, se puede seleccionar de manera precisa las tuberías paralelas que cumplen con los requisitos necesarios para lograr una simplificación hidráulica adecuada en el modelo de redes de distribución de agua. Para la identificación de las tuberías paralelas el algoritmo toma como referencia una tubería y compara el par de nodos de esta con todas las de la red hasta encontrar alguna otra que comparta el mismo par de nodos si es que existiese. En caso

contrario la tubería es almacenada en una lista de tuberías no candidatas para este proceso de simplificación, y se prueba con la siguiente tubería que se encuentre fuera de este listado con el mismo proceso.

Una vez identificadas dos tuberías que cumplan los requisitos se proceden a representar ambas como un único conducto equivalente. Esta nueva tubería debe ser capaz de transportar el mismo caudal trasegado por las tuberías originales, mientras que crea la misma pérdida de carga.

Para lograr este objetivo se introducen variables para la nueva tubería equivalente como lo son:

- Longitud Equivalente (L_e)
- Diámetro Equivalente (ϕ_e)
- Coeficiente Hazen-Williams equivalente (CHW_{eq}) en el caso de que la ecuación de pérdida sea la de Hazen Williams.
- Factor de fricción equivalente para los casos donde la ecuación de pérdida sea la de Darcy Weisbach.
- Resistencia equivalente.

La longitud equivalente en los casos donde las tuberías originales cuentan con longitudes diferentes se calcula como un promedio de las longitudes de las tuberías paralelas.

$$L_{eq} = \frac{L_1 + L_2}{2} \quad (5)$$

donde:

- L_1 es la longitud de la tubería 1.
- L_2 es la longitud de la tubería 2.
- L_{eq} es la longitud equivalente para el nuevo conducto.

El coeficiente de Hazen-Williams equivalente viene dado por la expresión:

$$CHW_{eq} = \frac{CHW_1 * L1 + CHW_2 * L2}{L1 + L2} \quad (6)$$

donde

- $CHW_{1,2}$ representa el coeficiente de Hazen Williams de las tuberías originales
- $L_{1,2}$ es la longitud de las tuberías originales.

Para obtener la resistencia de cada tubería se utiliza la siguiente formula, derivada de la ecuación de Hazen Williams:

$$J = 10.61 * \frac{1}{CHW^{1.85}} * \frac{1}{\phi^{4.87}} * Q^{1.85} \quad (7)$$

donde:

- J es la resistencia genera por la tubería al paso del fluido.
- CHW es el coeficiente de Hazen Williams de la tubería.
- Q es el caudal en m^3 / s trasegado por la tubería.
- ϕ es el diámetro en m de la tubería.

$$R = \frac{10.61}{CHW^{1.85}} * \frac{L}{\phi} \quad (8)$$

Para calcular la resistencia equivalente, se utiliza la siguiente fórmula, donde $R1$ representa la resistencia de la tubería 1 y $R2$ la resistencia de la tubería 2

$$Req = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{R1}} + \frac{1}{\sqrt{R2}}\right)^2} \quad (9)$$

Estas variables permiten determinar los parámetros necesarios para la nueva tubería equivalente, asegurando que pueda transportar el mismo caudal y generar la misma pérdida de carga que las tuberías originales. Una vez obtenidos estos valores equivalentes, se procede al cálculo del diámetro equivalente utilizando la siguiente ecuación

$$\varnothing eq = 10.61 * \frac{\frac{Leq}{CHWeq^{1.85}}}{Req^{\frac{1}{4.87}}} \quad (10)$$

Con estos parámetros equivalentes definidos, se garantiza que el nuevo conducto mantenga la misma pérdida de carga del modelo original y sea capaz de transportar el caudal total de ambas tuberías. Estos cálculos y valores permiten llevar a cabo la simplificación y optimización de las redes de distribución de agua, asegurando resultados confiables y eficientes.

3.3.1.1. APLICACIÓN DEL ALGORITMO

Para la demostración de la simplificación de tuberías paralelas, se ha implementado el proceso descrito a la RDA utilizada en la segunda edición de “Battle of the wáter Networks” (Marchi et al., 2014) conocida como C-Town. A continuación, se muestra la red en la Figura 12, donde se han resaltado en color rojo las tuberías paralelas encontradas por el algoritmo de detección.

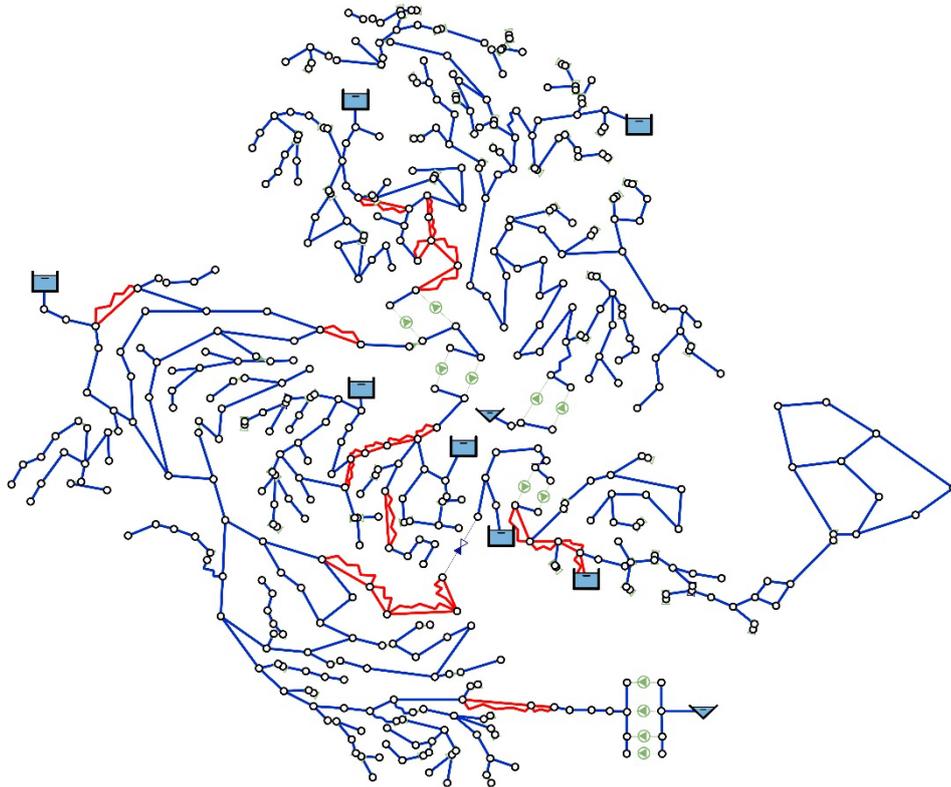


Figura 12 identificación de tuberías paralelas adaptación de C-town (Marchi et al., 2014)

En la Tabla 3 se presentan las características de la red antes del proceso de simplificación, esta tabla junto con la Tabla 4 nos permitirán realizar una comparativa directa y evaluar los cambios ocasionados por la simplificación.

Tabla 3 Características de la adaptación de la red D-Town.

Características	Valor
Número de Conexiones	490
Número de Embalses	2
Número de Depósitos	7
Número de Tuberías	440
Número de Bombas	12
Número de Válvulas	92
Elevación media de los nudos (km)	85.54
Longitud de tuberías (m)	69.32

En la Figura 12 se puede observar que existe un total de 24 pares de tuberías paralelas a lo largo de la red. En este caso de estudio se ha decidido realizar la simplificación de paralelas para un tiempo determinado de la simulación hidráulica, consiguiendo así la eliminación de las 24 tuberías paralelas, las cuales han sido sustituidas por una nueva tubería equivalente como se puede ver a continuación en la Figura 13.

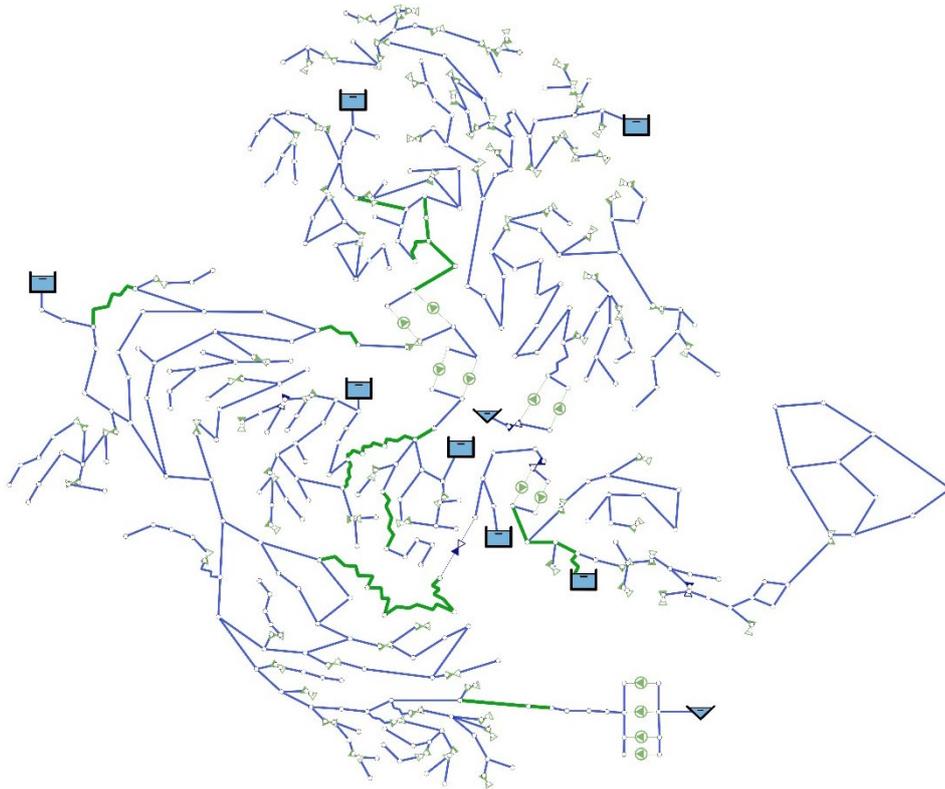


Figura 13 Red C-town con simplificación de tuberías paralelas.

Tabla 4 Características red C-town simplificación de paralelas

Características	Valor	Unidad
Número de Conexiones	490	Ud
Número de Embalses	2	Ud
Número de Depósitos	7	Ud
Número de Tuberías	416	Ud
Número de Bombas	12	Ud
Número de Válvulas	92	Ud
Elevación media de los nudos	85.56	m
Longitud de tuberías	64.89	Km

De acuerdo con los datos presentados, se ha realizado una reducción significativa del número de tuberías en el sistema, específicamente 48 tuberías que eran paralelas en la red se han sustituido por 24 equivalentes, lo que representa un 5.45% del total de tuberías. Estas tuberías paralelas han sido reemplazadas por un único conducto hidráulico que ha sido capaz de representar adecuadamente la pérdida de carga de las tuberías originales.

Al analizar la elevación media de los nodos, se observa que ha habido un cambio mínimo, pasando de 85.53 a 85.56. Este cambio se encuentra dentro del rango permitido para la simplificación, lo que indica que el nuevo conducto equivalente ha mantenido adecuadamente las características hidráulicas de la red.

Para comprender mejor la metodología utilizada, se tomará como ejemplo un par de tuberías Figura 14 antes de la simplificación (P22 y T22) y se compararán sus características con el elemento por el cual han sido reemplazadas. Se enfocará en el tramo principal de la RDA para un análisis detallado de cómo el proceso de simplificación ha afectado la red.

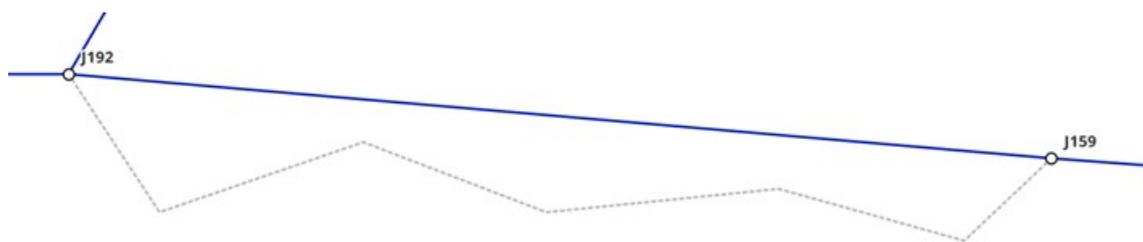


Figura 14. Ejemplo de simplificación de tuberías paralelas.

Tabla 5 Comparativa de características tuberías originales y tubería equivalente.

Características	P22	T22	P22eq
Longitud(m)	342.04	342.04	342.04
Diámetro(mm)	406	254	436.907
Rugosidad	81.1136	120	100.556
Caudal Lps	282.87	121.88	404.75
Perdida Unitaria m/km	24.19	24.19	23.34

De acuerdo con los resultados de la Tabla 5 se puede observar una pérdida unitaria bastante similar, indicio de que el nuevo conducto ha sido diseñado de manera efectiva para mantener las características de la red, además vemos que la nueva tubería es capaz de trasegar la suma de los caudales de las tuberías originales, asegurando así que el flujo se mantenga en la dirección establecida.

3.3.2. SIMPLIFICACIÓN DE NODOS TERMINALES

La técnica de eliminación de nudos terminales es una estrategia clave dentro de la metodología propuesta. Su objetivo es simplificar la red de distribución de agua identificando y eliminando aquellos nodos que tienen una única tubería incidente, es decir, una entrada sin salidas adicionales.

Es importante destacar que los nodos que se consideran para esta técnica no pueden ser embalses o depósitos, ya que su eliminación afectaría el balance hidráulico del sistema. Asimismo, las líneas conectadas a estos nodos deben ser tuberías, excluyendo válvulas o bombas. Además, los elementos de control tampoco pueden ser eliminados, ya que desempeñan un papel fundamental en la validación de la simplificación.

Al identificar y eliminar estos nodos terminales, se reduce la complejidad de la red al descartar elementos que no aportan conexiones adicionales. Esto tiene como resultado una simplificación significativa en la topología de la red, facilitando su análisis y optimización posterior.

Sin embargo, para mantener el funcionamiento hidráulico del sistema, es necesario reasignar la demanda del nudo terminal a otro nudo base. El nudo base se define como el nudo al cual estaba conectada la tubería que se ha eliminado. La reasignación de la demanda se hace mediante la suma de las demandas del nudo simplificado y el nudo base.

$$DB_{nbs} = DB_{nb} + DB_{nbt} \quad (11)$$

donde:

- DB_{nbs} es la nueva demanda base para el nudo de simplificación.
- DB_{nb} es la demanda base original del nudo base.

- DB_{nt} es la demanda base del nudo terminal simplificado.

La reasignación de la demanda base, por sí sola, no garantiza la conservación del equilibrio de flujos y presiones en el sistema de distribución de agua. Esto se debe a que la demanda base no considera los patrones de consumo específicos de la red. Para abordar esta limitación, se lleva a cabo una comparación entre los patrones de demanda del nudo sujeto a simplificación y el nudo base.

En el caso de identificar diferencias significativas en los patrones de demanda, se toma la medida de crear un nuevo patrón de demanda. Este nuevo patrón se aplicará al nudo base, asegurando así que el sistema mantenga una demanda coherente. El objetivo es lograr una distribución equitativa y realista de la demanda en la red simplificada, sin comprometer el comportamiento hidráulico. Para el cálculo del nuevo patrón de demanda en caso de necesitarlo, se realizaría con la expresión (12), esto debe hacerse con cada uno de los coeficientes de modulación que tengan los patrones originales.

$$Pat_{eq} = \frac{DB_{nb} * C_{nb} + DB_{nt} * C_{nt}}{DB_{nbs}} \quad (12)$$

donde:

- Pat_{eq} es el nuevo patrón que debe de tener el nudo base luego de la simplificación,
- C_{nb} es el coeficiente del patrón original asignado al nudo base.
- C_{nt} es el coeficiente de patrón original asignado al nudo terminal.
- DB_{nbs} es la sumatoria de las demandas bases originales para los nudos implicados en la simplificación.

3.3.2.1. APLICACIÓN DEL ALGORITMO

Al igual que en el algoritmo anterior, se plantea la simplificación de nudos terminales en un caso de estudio sencillo. Para ello se ha tomado como red la conocida *Rural Network* en su versión modificada, encontrada en los benchmarks de la universidad de Exeter. Esta red se basa en un sistema de riego de Australia y fue desarrollado originalmente por Marchi et al,(2014) como parte

de un estudio de optimización del diseño .En la Figura 15 se observa la red original y en la Figura 16 se observa la red después de aplicarle el algoritmo de simplificación de nudos terminales.

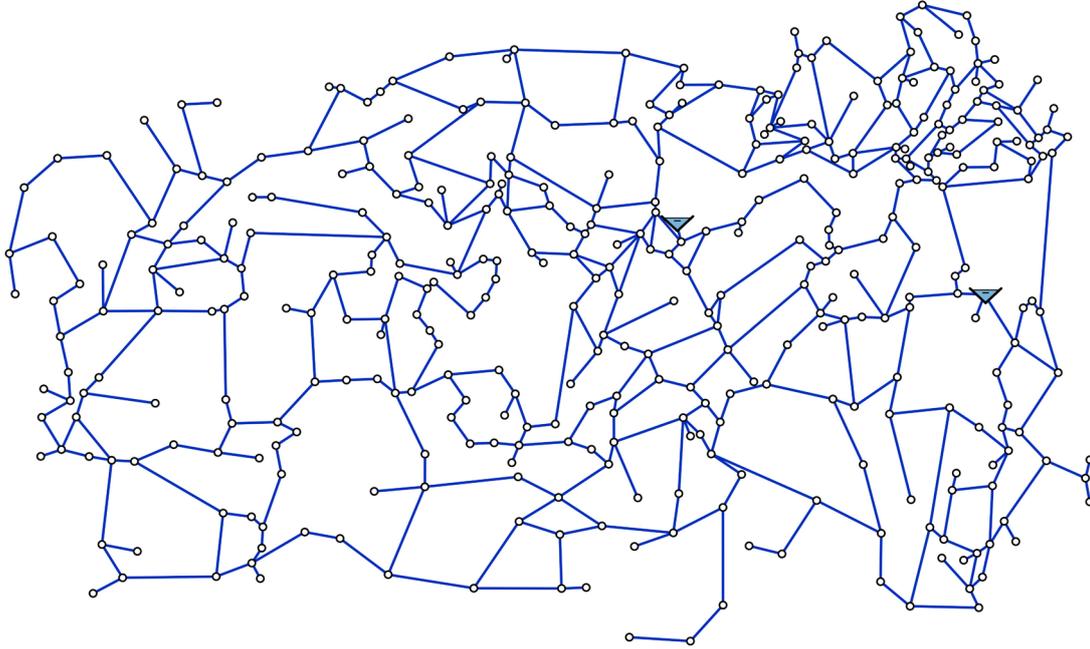


Figura 15. Red original Rural network.

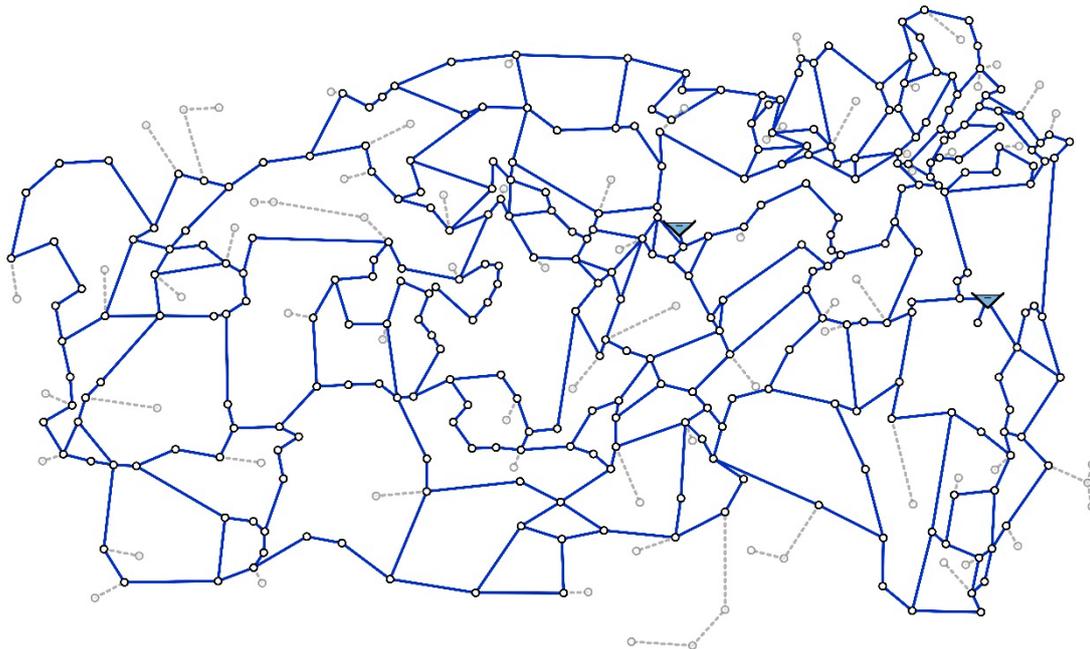


Figura 16. Red Rural network con simplificación de nudos terminales.

La simplificación realizada mediante el algoritmo de nudos terminales ha tenido un impacto significativo en la red de distribución de agua. En la Tabla 6 se pueden observar los cambios y el efecto de esta simplificación en diferentes aspectos de la red.

Tabla 6 Comparativa de la red Rural Network con simplificación de nudos terminales.

Características	Red original	Red Simplificada	Comparativa
Numero de conexiones	379	307	19%
Numero de embalses	2	2	0%
Numero de depósitos	0	0	0%
Numero de tuberías	476	404	15%
Numero de bombas	0	0	0%
Numero de válvulas	0	0	0%
Longitud de tuberías (km)	1288.43	1192.69	7%
Demanda base total (l/s)	64.52	64.52	0%
Elevación media de nudos (m)	169.27	169.27	-0.0012%

Es importante resaltar que, tras la aplicación del algoritmo de simplificación de nudos terminales, se ha logrado una significativa reducción del 19% en la cantidad de nudos en la red. Esta reducción se ha aplicado de manera exitosa en la mayoría de los casos, con la excepción de un único nudo. Este nudo particular se mantiene debido a su conexión con el embalse que abastece la red, lo que demuestra que se ha respetado rigurosamente las restricciones previamente establecidas.

Este proceso de simplificación ha resultado en una disminución del 15% en la cantidad de tuberías presentes en la red. Es notable que, a pesar de estas reducciones significativas, la elevación media de la red se ha mantenido prácticamente inalterada, evidenciando un margen de error mínimo del 0.0012%. Este nivel de precisión indica que la simplificación implementada no ha comprometido de manera apreciable las características hidráulicas del sistema en estudio.

Cabe destacar que la longitud total de las tuberías ha experimentado una disminución de tan solo un 7%, un resultado que se debe a que la mayoría de las tuberías eliminadas correspondían a ramificaciones de corta longitud. Estas ramificaciones representaban una porción relativamente pequeña dentro del esquema general de la red.

En conjunto, estos resultados son un testimonio claro de la efectividad del algoritmo de nudos terminales en la simplificación de la red de distribución de agua. La disminución tanto en la cantidad de nudos como en el número de tuberías se ha logrado con éxito, sin comprometer la elevación media y minimizando el impacto en la longitud total de las tuberías. Este enfoque

demuestra su potencial en la optimización de la infraestructura hidráulica, manteniendo al mismo tiempo la integridad y el rendimiento del sistema de distribución de agua.

3.3.3. SIMPLIFICACIÓN DE TUBERÍAS EN SERIE

Para la simplificación de tuberías en serie, se sigue una metodología que involucra una selección inicial de candidatos basada en criterios topológicos de la red. Se busca un nudo con un grado de conectividad igual a dos, es decir, que tenga exactamente dos tuberías incidentes.

Una vez identificado el candidato, se procede a realizar revisiones adicionales de los parámetros seleccionados por el usuario y las limitaciones generales que se le han asignado a este algoritmo. Estos parámetros permiten adaptar el grado de la simplificación según las necesidades específicas. Los parámetros considerados son:

- Tipo de nudo. Se verifica que el nudo seleccionado no sea un depósito ni un embalse, ya que estos nodos desempeñan un papel vital en el funcionamiento y la distribución del agua en la red y no deben ser eliminados.
- Demanda base. Se comprueba que la demanda base del nudo seleccionado esté por debajo de un valor máximo admisible establecido por el usuario. Esto garantiza que la simplificación no afecte significativamente la distribución de caudales en la red de distribución de agua.
- Tipo de líneas incidentes. Se verifica que las líneas que inciden en el nudo seleccionado sean tuberías, excluyendo válvulas y bombas. Esto asegura que las tuberías seleccionadas sean las adecuadas para ser simplificadas.
- Diferencia de diámetros. Se establece un máximo de diferencia de diámetros permitido entre las tuberías en serie. Esto garantiza que la nueva tubería equivalente pueda mantener un perfil hidráulico adecuado y evitar desequilibrios en el flujo. Además, ayuda a prevenir que se combine una tubería principal con una ramificación. En la ecuación (13) se puede apreciar cómo se calculó la diferencia de diámetro, considerando que \varnothing_1 es el mayor de los dos.

$$\Delta\phi = \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1} * 100 \quad (13)$$

- Diferencia de rugosidad: Se establece un valor máximo admisible de diferencia de rugosidad, en este caso, se cuenta con dos coeficientes diferentes, el coeficiente de Hazen Williams(14) y la rugosidad de Darcy Weisbach.

$$\Delta CHW = \frac{CHW_1 - CHW_2}{CHW_1} * 100 \quad (14)$$

donde:

- ΔCHW es el porcentaje de diferencia entre los coeficientes de Hazen Williams
- CHW_1 es el coeficiente de Hazen Williams de la tubería 1, entendiéndose como tubería 1 aquella que posea el mayor valor de dicho coeficiente.
- CHW_2 es el coeficiente de Hazen Williams de la tubería 2, entendiéndose como tubería 2 aquella que posea el menor valor de dicho coeficiente.

$$\Delta f = \frac{f_1 - f_2}{f_1} * 100 \quad (15)$$

donde:

- Δf es la diferencia entre los factores de fricción de las tuberías.
- f_1 es el factor de fricción de la tubería 1, entendiéndose como tubería 1 aquella que posee el mayor valor de dicho coeficiente.
- f_2 es el factor de fricción de la tubería 2, entendiéndose como tubería 2 aquella que posee el mayor valor de dicho coeficiente.

La inclusión de estos criterios adicionales desempeña un papel fundamental en la selección de las tuberías en serie que son candidatas para la simplificación. Estos criterios son esenciales para garantizar que las tuberías seleccionadas cumplan con las condiciones esenciales para su reemplazo. Al tomar en cuenta estos parámetros adicionales, se asegura que la nueva tubería simplificada preserve las propiedades hidráulicas y operativas cruciales para el funcionamiento adecuado de la red de distribución de agua.

Ambos parámetros, que abarcan desde un valor del 0% hasta el 100%, tienen implicaciones significativas en el proceso de selección. En el extremo inferior (0%), se establece la restricción de que tanto los diámetros como las rugosidades de las tuberías en serie deben ser idénticos. Esto asegura un alto grado de uniformidad y coherencia en las características de las tuberías seleccionadas para la simplificación.

En contraste, en el otro extremo (100%), ambos criterios se anularían por completo. En esta situación, solo las limitaciones topológicas de la red, como la conectividad y la disposición, influirían en la selección de las tuberías a simplificar. Esta amplitud de valores ofrece un rango flexible que permite adaptar la selección de tuberías en serie para cumplir con requisitos específicos y consideraciones prácticas.

3.3.3.1.1. OPERACIÓN DE SIMPLIFICACIÓN, CALCULO DE VALORES EQUIVALENTES

Al encontrar un grupo de elementos que cumplan con los requisitos preestablecidos por el usuario se procede a su simplificación. Al igual que en las tuberías paralelas, se debe encontrar un único conducto capaz de generar la misma pérdida de carga desde el nudo 1 hasta el nudo 3.

Para la longitud equivalente de la nueva tubería, es tan sencillo como la suma de ambas longitudes, como se puede ver en la ecuación (16) donde L_{eq} es la longitud equivalente para la nueva tubería, L_1 es la longitud de la tubería uno y L_2 la longitud de la tubería dos.

$$L_{eq} = L_1 + L_2 \quad (16)$$

Para el cálculo de la rugosidad equivalente, teniendo la limitante a definir por el usuario de diferencia máxima de coeficiente de rugosidad que se correspondería en el caso de que la ecuación de pérdida de carga sea Hazen-Williams a su coeficiente y en el caso de Darcy-Weisbach a la diferencia del factor de fricción de las tuberías.

$$CHW_{eq} = \frac{CHW_1 * L1 + CHW_2 * L2}{L1 + L2} \quad (17)$$

Para la ecuación de factor de fricción equivalente para los casos de Darcy Weisbach(18) se presenta la problemática de que el factor de fricción(19) depende del número de Reynolds y por consiguiente del caudal

$$hf = \frac{8 * f * l}{g * \emptyset^5 * \pi^2} * Q^2 = R * Q^2 \quad (18)$$

donde:

- Hf es la pérdida de energía por fricción en el conducto.
- f es el factor de fricción de la tubería.
- \emptyset es el diámetro de la tubería.
- L es la longitud de la tubería.
- Q es el caudal que pasa por la tubería.
- g es la aceleración de la gravedad.
- R es la resistencia de la tubería.

$$f = \frac{0,25}{\left(\log_{10} \frac{k/\phi}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right)^2} \quad (19)$$

donde:

- f es el factor de fricción de la tubería.
- k es la rugosidad de la tubería.
- ϕ es el diámetro de la tubería.
- Re es el número de Reynolds.

La cual también puede escribirse de la siguiente manera

$$f = \frac{Re_q * \pi^2 * \phi^5 * g}{8 * L_{eq}} \quad (20)$$

En esta metodología se presentará para los casos de Darcy-Weisbach la rugosidad equivalente de acuerdo con la ecuación

$$\epsilon_{eq} = \frac{\epsilon_1/\phi_1 * L1 + \epsilon_2/\phi_2 * L2}{L1 + L2} \quad (21)$$

Una vez obtenido el valor de la rugosidad equivalente se podrá realizar una estimación del factor de fricción e iterar a través de los diámetros equivalentes hasta que converjan. Para el cálculo del diámetro equivalente en los casos de Hazen-Williams la pérdida de carga se ha calculado con la ecuación.

$$hf = 10.61 * \frac{CHW^{1.85}}{\phi^{4.87}} * l \quad (22)$$

Una vez obtenida la pérdida de carga generada por ambas tuberías, es posible obtener la pérdida de carga que debe generar la tubería equivalente y con esta realizar el cálculo del diámetro equivalente.

$$\phi_{eq} = \left[\left(10.61 * \frac{L_{eq}}{CHW_{eq}^{1.85}} \right)^{\frac{1}{4.87}} \right] * 1000 \quad (23)$$

Además del cálculo de las propiedades de la nueva tubería se debe realizar una distribución de la demanda del nudo intermedio en función de la longitud y diámetro que posea la tubería adyacente al nudo.

$$\partial = \phi_1 * L_1 + \phi_2 * L_2 \quad (24)$$

donde:

- ∂ es el factor que se utilizara para la distribución de la demanda.
- ϕ_{1-2} Son los diámetros de las tuberías en serie a simplificar.
- L_{1-2} : Son las longitudes de las tuberías en serie a simplificar.

Con este factor se puede dividir la demanda intermedia en función del diámetro y longitud de las tuberías adyacentes donde para cada nudo se realizará el cálculo de la proporción a añadir con la siguiente ecuación

$$Prop_{db} = \frac{DB_{int} * L_i \phi_i}{\partial} \quad (25)$$

donde

- $Prop_{db}$ es la proporción de la demanda base del nudo intermedio que se dividirá a los nudos inicial y final de las tuberías en serie.
- DB_{int} : Es la demanda base del nudo intermedio que será simplificado.
- L_i = Es la longitud de una de las tuberías a simplificar.
- ϕ_i = Es el diámetro de una de las tuberías a simplificar.

En caso de que los 3 nudos no compartan el mismo patrón de consumo se debe realizar un nuevo patrón para cada nudo extremo de la simplificación, esto se hará para cada instante de tiempo y para ambos nudos extremos con la ecuación siguiente

$$Pat_{eq} = \frac{DB_{nb}C_b + Prop_{db} * C_i}{DB_{nb}Prop_{db}} \quad (26)$$

donde:

- Pat_{eq} es el nuevo coeficiente para el patrón del nudo a tratar en cada instante de tiempo.
- DB_{nb} es la demanda base del nudo extremo base a tratar en cada instante de tiempo
- $Prop_{db}$ es la proporción de la demanda base que le corresponda al nudo N_i .
- C_b es el valor de la curva de modulación del nudo extremo base para cada instante de tiempo.
- C_i es el valor de la curva de modulación del nudo intermedio para cada instante de tiempo.

3.3.3.2. APLICACIÓN DEL ALGORITMO

Para la aplicación del algoritmo es necesario encontrar un nudo con grado de conectividad igual a 2, como el nudo B de la Figura 17 que cumpla los parámetros de diferencia de rugosidad y diámetro entre las tuberías adyacentes y el propio nudo debe contar con una demanda base menor la demanda base máxima aplicada por el usuario.



Figura 17. Unión de tuberías en serie.(Aguilera, 2021.)

donde:

- Q_0 es el caudal que ingresa al nudo A.
- Q_a es la demanda del nudo A.
- Q_1 es el caudal trasegado por la tubería A-B.
- Q_b es la demanda del nudo B.
- Q_2 es el caudal trasegado por la tubería B-C.
- Q_{a-b} es la nueva demanda del nudo A.
- Q_3 es el caudal trasegado por la nueva tubería A-C.
- Q_{c-b} es la nueva demanda del nudo C.
- Q_4 es el caudal de salida del nudo C.

Para la aplicación del algoritmo se ha seleccionado la red de Richmond standard, la cual es una descripción general, aunque no actualizada, del sistema de distribución de agua de Richmond, propiedad de Yorkshire Water en el Reino Unido. En la Figura 18 se puede ver la red original, y en Tabla 9 característica de la red Richmond Standard. podemos a ver los elementos y características de la red. El ejemplo de la relocalización de la demanda y cálculo de valores

equivalentes de acuerdo con la nomenclatura de la Figura 17 se puede ver en las Tabla 7 y Tabla 8.

Tabla 7 Distribución de caudales para simplificación de tuberías en serie.

Caudales	Red Original	Red Simplificada
Q0	32.47	32.47
Q1	22.48	21.54
Q2	19.98	0
Qa	10	10.94
Qb	2.5	0
Qc	7.49	9.05
Q4	12.49	12.49

Tabla 8 Cálculo de valores equivalentes para tuberías en serie.

Características	T1	T2	Teq
Diámetro	144	126	131.34
Rugosidad	151	150	150.35
Caudal	22.48	19.98	21.54
Longitud	96	181	277

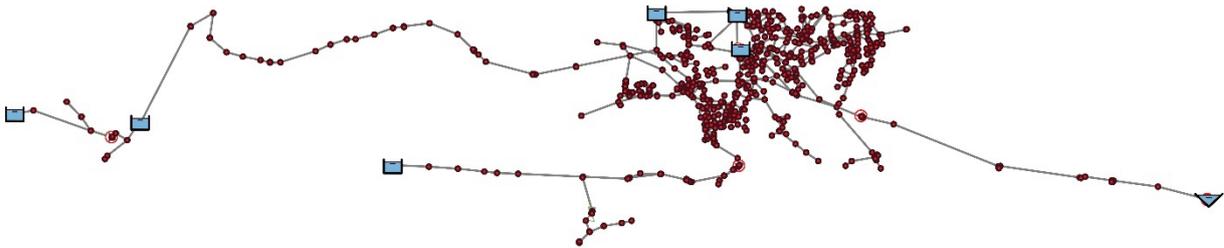


Figura 18. Red Richmond standard.

Tabla 9 Característica de la red Richmond Standard.

Características de la red	Valor
Núm. Nudos	865
Núm. Tuberías	949
Longitud Total de tuberías (km)	75.61
Elevación media de los nudos (m)	206.04

En este ejemplo solo se ha utilizado el algoritmo de simplificación de tuberías en serie y se ha logrado una reducción de 71% del número de nudos y 65% de las tuberías manteniendo la longitud total de las tuberías y la demanda base total de la red como se puede apreciar en la Tabla 10 Comparativa red original y red con simplificación tuberías en serie.

Tabla 10 Comparativa red original y red con simplificación tuberías en serie.

Características	Red original	Red Simplificada	Comparativa
Número de conexiones	865	254	71%
Número de embalses	1	1	0%
Número de depósitos	6	6	0%
Número de tuberías	949	329	65%
Número de bombas	7	7	0%
Número de válvulas	1	1	0%
Longitud de tuberías (Km)	75.61	75.61	0%
Demanda base total (l/s)	16.11	16.11	0%
Elevación media de nudos (m)	206.04	204.74	0.01%

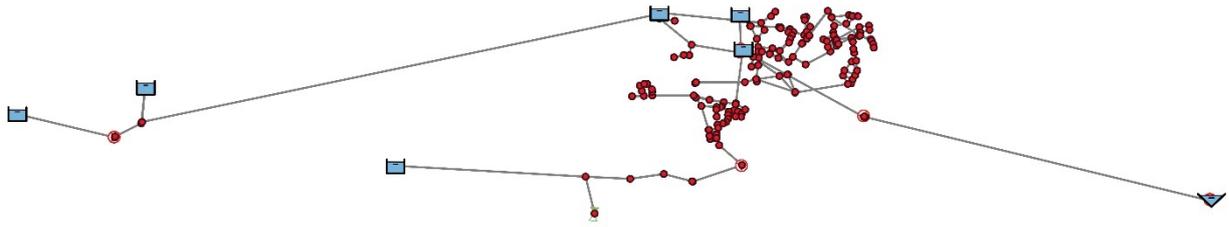


Figura 19. Richmond standard simplificación de tuberías en serie.

En cuanto al cambio topológico de la red se puede apreciar como en el tramo de la tubería principal donde existían múltiples nudos, ha sido sustituido por un único conducto que conecta los nodos a la salida de ambos embalses, estos nudos son el 735 y 323 donde las alturas sufrieron una ligera variación, pasando el nudo 735 de 6.18m a 6.07m y el 323 de 20.72 m a 20.92 m.

3.3.4. SIMPLIFICACIÓN POR UNIÓN DE NODOS CERCANOS

Esta operación consiste en reemplazar un grupo de nudos que se encuentren vinculadas entre ellas por tuberías de longitudes cortas, parámetro el cual puede ser determinado por el usuario, por un único nudo, eliminando en el proceso estas tuberías mencionadas. En la simplificación de grupos de nudos vinculados por tuberías de longitud cortas, se establecen limitaciones adicionales para seleccionar los candidatos adecuados para la simplificación, estas limitaciones incluyen:

1. Diferencia de cota máxima: El usuario puede especificar la diferencia máxima admisible de cotas entre los nudos a simplificar. Si la diferencia de cota entre los nudos cumple con este parámetro, se procede a simplificarlos en un único nudo. La cota del nuevo nudo resultando viene dada por la siguiente expresión:

$$Z_{ns} = \sum_{i=1}^n Z_i \quad (27)$$

donde:

- Z_{ns} es la cota del nuevo nudo de simplificación.

- n es el numero de nudos a simplificar.
 - Z_i es la Cota de los nudos a simplificar.
2. Demanda máxima admisible: Además de la diferencia de cota máxima, se introduce la limitación de la demanda máxima admisible, esto permite al usuario establecer un valor límite para la demanda de los nudos a simplificar. Esta limitación se aplica con el objetivo de preservar los nudos que se consideren vitales para el funcionamiento correcto de la red.

Una vez obtenido un grupo de nodos que cumplan con estas limitantes se debe proceder a la relocalización de demanda y creación de un nuevo patrón de consumo equivalente, la nueva demanda viene dada por la expresión.

$$Db_{ns} = \sum_{I=1}^n DB_{nc} \quad (28)$$

donde:

- DB_{ns} Es la nueva demanda base para el nudo de simplificación.
- DB_{nc} Demanda base de los nudos cercanos a ser simplificados.
- n es el número de nudos cercanos a simplificar.

Después de obtener la nueva demanda base para el nudo que se va a simplificar, se debe realizar una verificación de los patrones de consumo. Si todos los nudos comparten el mismo patrón, simplemente reasignar la demanda sería suficiente para mantener la demanda total del sistema. Sin embargo, si existen patrones de consumo diferentes entre los nudos, será necesario crear un nuevo patrón. La formulación para determinar este nuevo patrón es la siguiente:

$$C_{ns} = \sum_{i=1}^n \frac{DB_{nc} * C_{nc}}{DB_{ns}} \quad (29)$$

donde:

- C_{ns} Es el valor para cada instante de tiempo que tomara la curva de modulación para el nudo de simplificación.
- C_{nc} es el valor de la curva de modulación para cada instante de tiempo de los nudos cercanos.
- DB_{ns} es la demanda reasignada al nudo de simplificación.

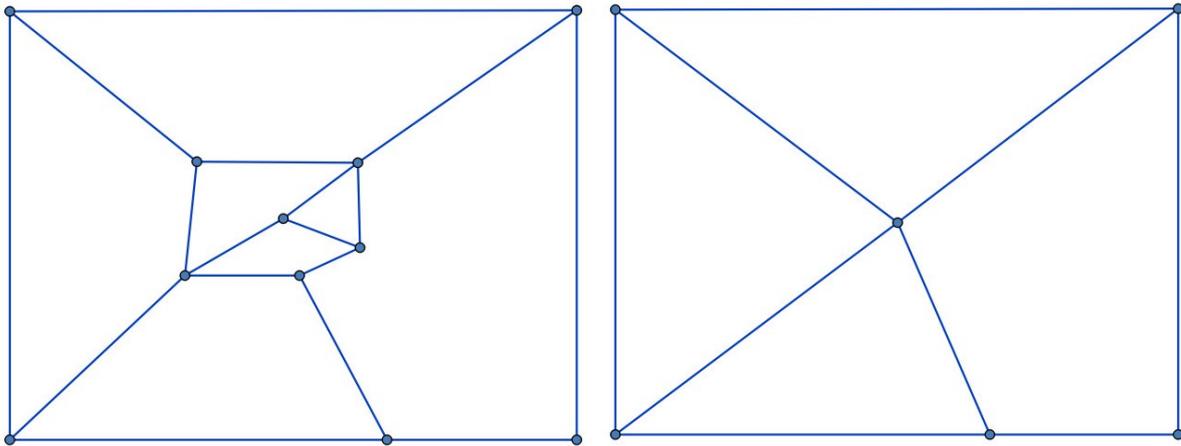


Figura 20. Ejemplo de simplificación de nudos cercanos.

3.4. ALGORITMOS BASADOS EN LA TEORÍA DE GRAFOS

3.4.1. BLOQUES TERMINALES

Se definirá como bloque terminal a un conjunto de nudos y líneas que componen un bloque el cual puede ser mallado o ramificado y que solo cuente con un punto de entrada a la red principal, es decir, se encuentran conectadas a la red a través de solo una tubería y un nudo base. Para su simplificación debe cumplir con ciertas características:

- Todos los vértices del bloque terminal a simplificar son nudos propiamente dichos, no debe existir dentro del bloque embalses, depósitos etc.
- Todas las aristas del bloque terminal a simplificar son tuberías propiamente dichas. No puede existir dentro del bloque estaciones de bombeo, válvulas o algún elemento de regulación.

- Ninguno de sus elementos, tuberías o nudos, puede formar parte de los elementos delimitados como elementos de control, ya que imposibilitaría su validación.

La identificación automática de los bloques terminales es un objetivo clave en este estudio, ya que la identificación visual puede resultar limitada. A diferencia de otros algoritmos mencionados, la identificación automática no se basa únicamente en los criterios de selección mencionados, sino que implica determinar si una estructura es un bloque terminal y luego verificar si cumple con los criterios para ser considerado candidato a eliminación. Para lograr este objetivo, se combinan conceptos hidráulicos con los de la teoría de grafos, lo cual es una de las principales contribuciones de este trabajo.

Como se mencionó en el marco teórico, la mayoría de los sistemas pueden ser representados y analizados como grafos. Al analizar una RDA de esta manera, los nodos y las líneas de la red se convierten en los vértices y aristas del grafo, respectivamente.

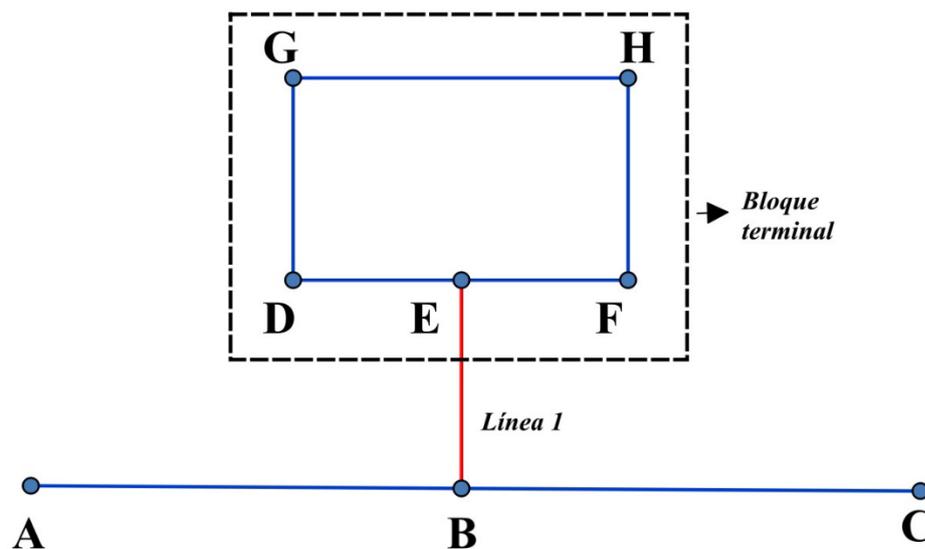


Figura 21. Identificación de bloque terminal.

Teniendo en cuenta lo anterior y la estructura del bloque terminal, se puede afirmar que al eliminar la línea L1 en la Figura 21, la red se divide en dos componentes, lo que implica que el grafo representado por la RDA ya no sería conexo y tendría más de una componente. Este concepto es fundamental para la identificación automática de la estructura de un bloque terminal.

Sin embargo, analizar todas las líneas de la red para determinar si son cortes o no sería ineficiente, especialmente en redes grandes. Para abordar esta limitación, recurrimos a otro concepto de la teoría de grafos, como el árbol generador o de expansión. Todo grafo tiene al menos un árbol de expansión que incluye todos los vértices del grafo. En el caso de la estructura mostrada en la, un árbol generador de esta red debe contener todos los nodos de la red, lo que implica necesariamente la presencia de la línea de entrada L1 (Figura 21). De esta manera, se puede afirmar que las líneas de corte siempre estarán presentes en el árbol generador del grafo.

Dado que las RDA pueden considerarse como grafos ponderados, donde los pesos de las aristas se definen en función de parámetros físicos de las tuberías, la metodología propuesta busca obtener el árbol de expansión mínima de la red utilizando el algoritmo de Prim para el *minimum spanning tree*. En este algoritmo, se elige un nodo inicial como fuente de agua de la red, este nodo será un embalse o depósito, y se utiliza la resistencia hidráulica de las tuberías como parámetro para determinar los pesos asociados a cada tubería. De esta manera, se obtiene un árbol de expansión mínima que abarca todos los nodos y recorre la red a través de las tuberías principales, priorizando aquellas con menor resistencia.

Una vez construido el árbol de expansión de la red, se emplea el concepto de aristas de corte mencionado anteriormente. Sin embargo, en este caso, la determinación de las aristas de corte se realiza exclusivamente para las líneas que se encuentran en el árbol generador, lo que permite un proceso de búsqueda más eficiente. A partir de la identificación de la estructura del bloque terminal, se procede a determinar los elementos que componen el bloque, haciendo un recorrido a través de los elementos que componen el subgrafo y verificar si cumplen con los criterios que determinan si la simplificación del bloque sería posible. Una vez identificado el candidato se aplica la técnica de forma iterativa, tomando como candidato aquella arista que logre el mayor número de elementos desconectados.

En cuanto a la reubicación de las demandas, se selecciona el nodo externo al bloque que está conectado a la línea de corte como nodo base para la simplificación. La nueva demanda base del nodo de simplificación será la suma de la demanda base existente en dicho nodo, más la suma de las demandas bases de los nodos del bloque. En caso de que existan múltiples patrones de consumo dentro del bloque, simplemente reubicar la demanda no sería suficiente para mantener el comportamiento hidráulico de la red. Por lo tanto, se procede al cálculo de un nuevo patrón, determinado por:

$$DB_{ns} = DBO_{ns} + \sum_{l=1}^n DB_{nbl} * C_{nbl} \quad (30)$$

donde:

- DB_{ns} será la nueva demanda base del nudo de simplificación
- DBO_{ns} es la demanda base original del nudo base o nudo de simplificación
- DB_{nbl} es la Demanda base del nudo i perteneciente al bloque terminal.
- n número de nudos componentes del bloque terminal.
- C_{nbl} Es el valor de la curva de modulación para la hora especificada del nudo i del bloque.

Una vez reasignada la demanda base de todo el bloque terminal al nudo de simplificación podemos con esta nueva demanda base calcular los valores de coeficiente de modulación para el nuevo patrón de demanda.

3.4.1.1. APLICACIÓN DEL ALGORITMO

Para la aplicación del algoritmo y comprobación de su validez se ha seleccionado la red de Balerna (Baños et al., 2009), la cual es una adaptación de una RDA de la ciudad de Almería, España. Las características de la red vienen descritas en la Tabla 11 y su topología en la Figura 22

Tabla 11. características de la red de Balerna.

Número de Conexiones	443
Número de Embalses	4
Número de Depósitos	0
Número de Tuberías	454
Número de Bombas	0
Número de Válvulas	0
Demanda base total l/s	2453.1
Longitud Total de tuberías (Km)	100.26
Altura promedio de la red (m)	88.96

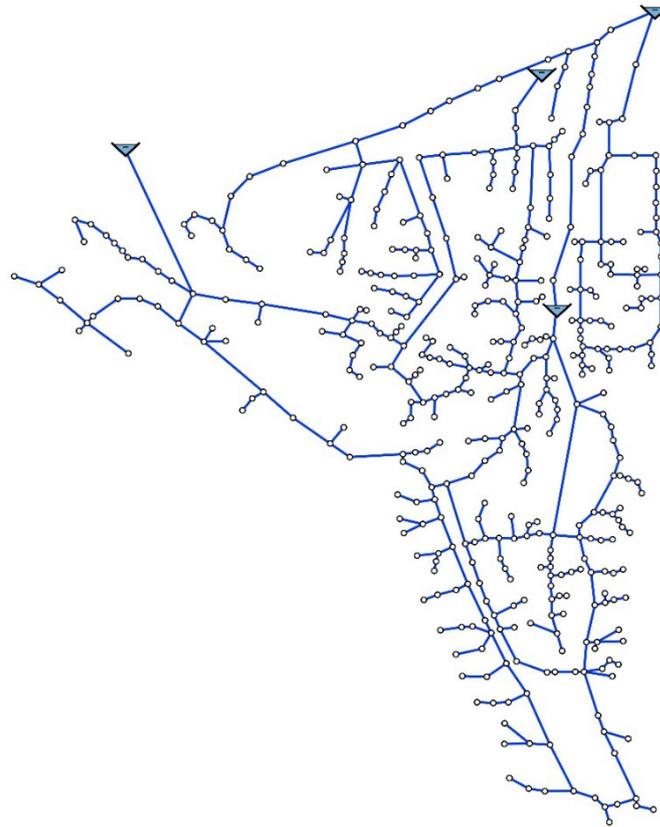


Figura 22. Red original Balerma

Después de implementar el algoritmo de simplificación de bloques terminales, excluyendo el proceso de validación, se procede a simplificar todos los bloques terminales según la metodología previamente expuesta. En la Figura 23 se muestra la representación de la red después de aplicar este algoritmo, mientras que en la Tabla 12 se realiza una comparativa entre las características principales del modelo original y el modelo simplificado. A través de esta tabla, se pone de manifiesto el nivel de simplificación logrado, la persistencia de los elementos exentos de simplificación, así como el reajuste de la demanda en los nodos eliminados para preservar las propiedades hidráulicas inherentes al modelo original.

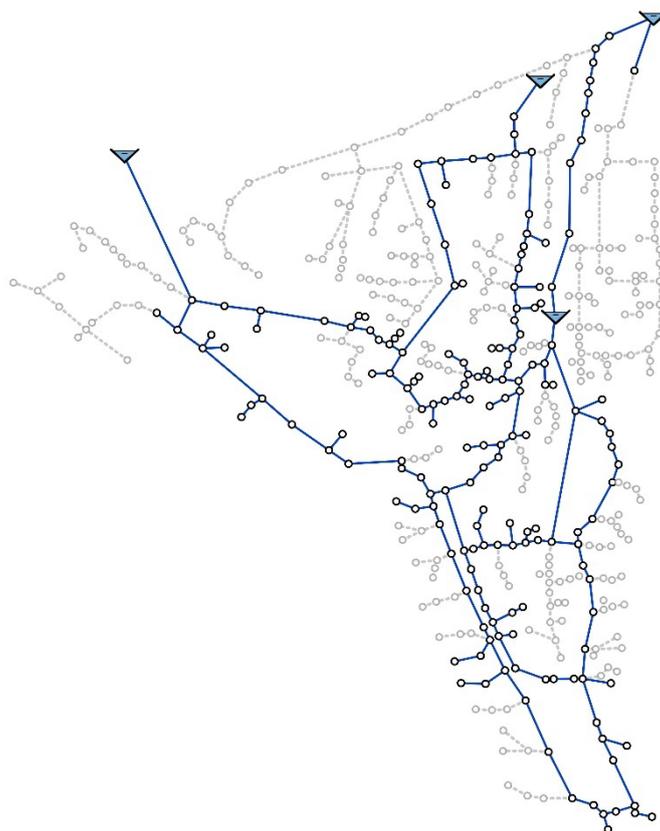


Figura 23. Red de Balerma con simplificación de bloques terminales.

Tabla 12 Comparativa red Balerma simplificación de bloques terminales.

Característica	Original	Simplificada	Comparativa
Núm. nudos	443	176	40%
Núm. Tuberías	454	185	41%
Núm. Embalses	4	4	100%
Núm. depósitos	0	0	0%
Núm. de bombas	0	0	0%
Núm. de válvulas	0	0	0%
Longitud total de tuberías (km)	100.26	51.362	51%
Elevación media de nudos(m)	88.96	83.7	94%
Demanda base total (l/s)	2453.1	2453.1	100%

Como se puede apreciar en el modelo simplificado, la aplicación del algoritmo de simplificación de bloques terminales engloba a los ramales terminales con más de un nudo terminal dentro de su ámbito. Este fenómeno se debe a que la estructura de un bloque terminal coincide con la de un ramal terminal. Sin embargo, al considerar un ramal terminal como un bloque, el conjunto de nodos que conforma dicho bloque se reduce a un solo nudo. Cabe mencionar que, en lo que

respecta a los criterios topológicos establecidos para los bloques terminales, no existe ninguna condición que requiera que estos deban constituir una malla cerrada.

En función de lo expuesto anteriormente, se puede concluir que la metodología de bloques terminales demuestra ser efectiva para simplificar tanto bloques como ramales que posean más de un nudo terminal. Esta metodología brinda al usuario la flexibilidad de emplear ambos enfoques de manera conjunta o por separado, según sus objetivos específicos de simplificación para cada red analizada.

A través de este caso de aplicación, se ha validado la eficacia de la metodología propuesta. Mediante la identificación automática de bloques terminales basada en conceptos de la teoría de grafos y parámetros topológicos, se logra simplificar cualquier RDA. En este proceso, se garantiza la preservación de las características hidráulicas esenciales de la red original, lo que confirma la validez y utilidad de la metodología en cuestión.

3.4.2. BLOQUES CON MÚLTIPLES ENTRADAS Y/O SALIDAS

La simplificación de bloques con múltiples entradas y salidas se basa en el análisis de un archivo obtenido después de las etapas previas de simplificación. Este algoritmo utiliza las líneas de control como puntos de referencia para delimitar los bloques intermedios que pueden ser candidatos a sustitución. El proceso comienza recorriendo el grafo desde un nodo fuente o embalse, marcando y almacenando los nodos recorridos como parte de un bloque X hasta encontrar una de las líneas de control. Una vez encontrada, se inspecciona la lista de nodos almacenados y sus matrices de adyacencia para confirmar si todos los nodos conectados a este nodo han sido visitados y marcados como parte del bloque X. Este proceso se repite para todos los nodos almacenados en la lista, asegurándonos que todas las tuberías adyacentes de los nudos del bloque hayan sido visitadas. Luego, se toma la siguiente línea de control y se inicia un nuevo recorrido a partir de ella, marcando todos los nodos como parte del bloque X+1. Este proceso se repite hasta que toda la red haya sido delimitada en diferentes bloques como se puede ver en la Figura 24.

Una vez que los bloques han sido delimitados, se procede a revisar cada bloque en busca de elementos que no puedan ser simplificados, como estaciones de bombeo, válvulas, nudos fuente o nudos de control. Estos elementos se excluyen de la simplificación, ya que su eliminación o sustitución podría afectar el funcionamiento adecuado del sistema. En cambio, se centra en simplificar las tuberías y nodos que no tienen impacto significativo en la distribución de caudales

y presiones. De esta manera, se logra una simplificación efectiva del sistema sin comprometer su funcionamiento óptimo.

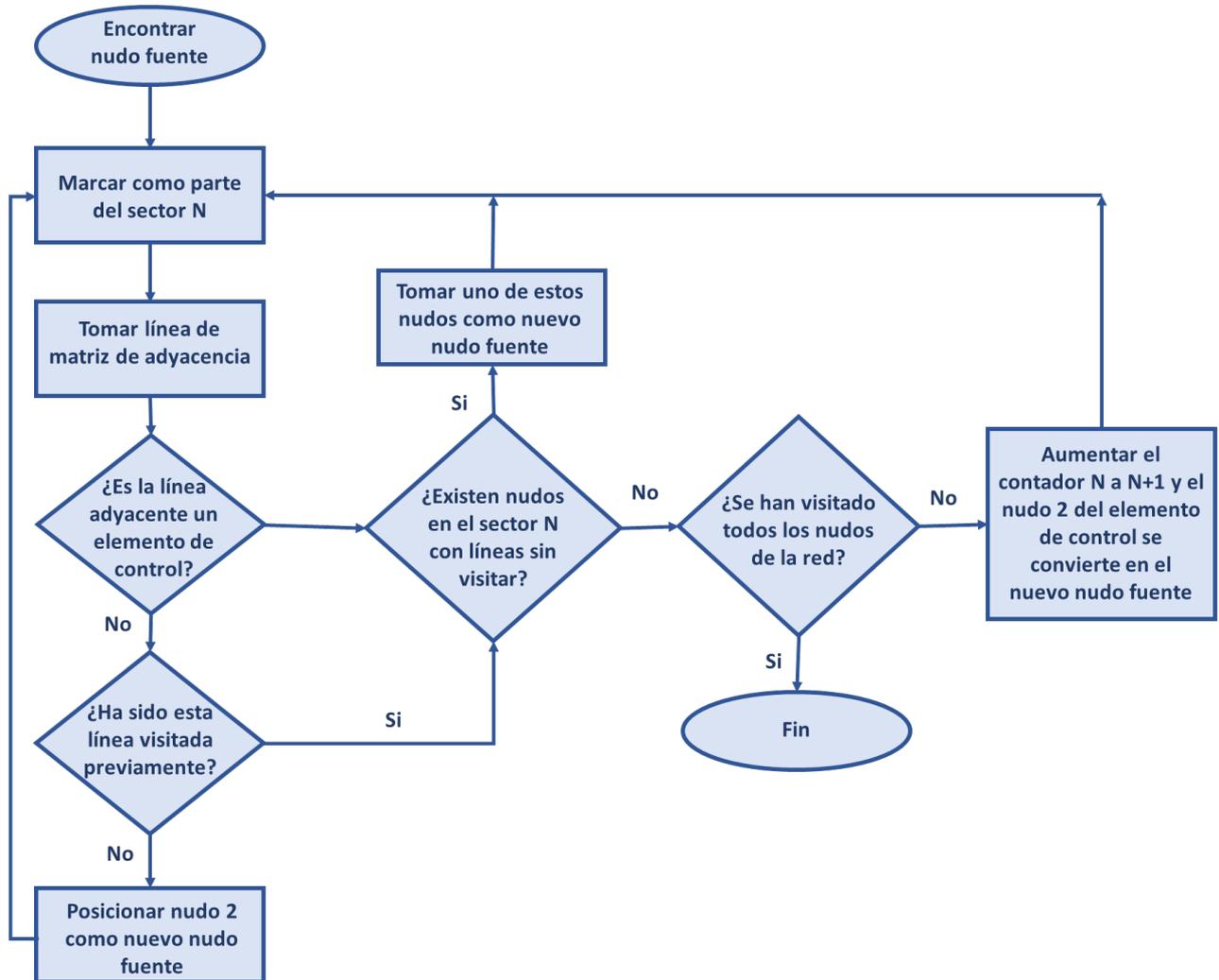


Figura 24. Diagrama de flujo del algoritmo de simplificación de bloques con múltiples entradas.

3.4.2.1.1. CÁLCULO DE VALORES EQUIVALENTES

Una vez detectado un bloque que pueda ser simplificado se procede a la creación de un nudo de simplificación y sus respectivos valores equivalentes, como serían la cota, demanda base, patrón de demanda. La cota del nudo viene dada por el promedio de las cotas de los nudos que conforman el bloque.

$$Z_{ns} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i}{n} \quad (31)$$

donde:

- Z_{ns} es la cota del nudo de simplificación.
- Z_i es la cota de los nudos que componen el bloque.
- n es el Numero de nudos contenidos en el bloque.

La demanda base de los nudos contenidos en el bloque a simplificar será acumulada y relocalizada en este nuevo nudo. Es decir, la demanda base será la suma algebraica de la demanda de todos los nudos contenidos en el bloque.

$$DB_{ns} = \sum_{i=1}^n DB_i \quad (32)$$

donde:

- DB_{NS} es la nueva demanda base del nudo de simplificación.
- DB_i es la demanda base del nudo i contenido en el bloque a simplificar.
- n es el número de nudos en el bloque a simplificar.

Debido a la posibilidad de que el bloque cuente con múltiples patrones de demanda, el solo reasignar las demandas base no bastaría para mantener las características de la red, por lo que se procederá a calcular un nuevo patrón de demanda. Los coeficientes para el patrón de demanda vendrán dados por la siguiente ecuación.

$$C_{ns} = \frac{\sum_{i=1}^n DB_{ni} * C_i}{DB_{ns}} \quad (33)$$

donde:

- C_{NS} es el coeficiente de demanda del NS para su nuevo patrón en cada hora de la simulación.
- DB_{ni} es la demanda base del nudo i del bloque a simplificar.
- C_i es el coeficiente de demanda del patrón asignado al nudo i en cada hora.
- DB_{ns} es la demanda base acumulada en el nudo de simplificación.

El cálculo del coeficiente de pérdidas se basa en la idea de mantener la repartición de caudales original después de la simplificación de la red. Para lograr esto, se introduce un elemento de regulación en cada una de las N tuberías de entrada al bloque, que genera una pérdida de carga suficiente para mantener el caudal original que trasegaban las entradas y salidas del bloque.

Las pérdidas menores de las tuberías se calcularon multiplicando el coeficiente de pérdidas por la energía cinética de entrada en la tubería. Es decir, se utiliza la siguiente fórmula.

$$hm = k * \frac{V^2}{2G} \quad (34)$$

donde:

- hm son las pérdidas menores generadas por una tubería.
- k es el coeficiente adimensional de pérdidas menores.
- V es la velocidad del fluido trasegado por la tubería.

Para emular la pérdida de carga generada por las tuberías eliminadas, se optó por reemplazarlas por válvulas. La resistencia hidráulica que ofrece una válvula se puede obtener mediante las siguientes expresiones.

$$R = \frac{8 \cdot k}{\pi^2 \cdot \varnothing^4 \cdot G} \quad (35)$$

$$R = \frac{1}{K_v^2} \quad (36)$$

donde:

R es la resistencia de la válvula.

k = coeficiente adimensional de pérdidas de la válvula.

\varnothing = diámetro de la válvula.

K_v = coeficiente de caudal de la válvula que depende del grado de apertura = $\tau \times K_{v0}$

K_{v0} = coeficiente de caudal máximo de la válvula para el mayor grado de apertura.

τ = la relación adimensional entre K_v y K_{v0} que adquieren valores entre 0 y 1.

Partiendo de estas ecuaciones se obtiene la consigna o el coeficiente adimensional de pérdidas que se le asignara a cada válvula mediante la ecuación:

$$k = \frac{\pi^2 \cdot \varnothing^4 \cdot G \cdot K}{8} \quad (37)$$

En el contexto de la simplificación, es importante que la resistencia mínima generada por una válvula en cada tubería de entrada esté relacionada con la máxima altura piezométrica que puede alcanzar el nudo de simplificación NS. Para determinar esta altura máxima en el nudo NS, se

analiza la conservación de energía entre los nudos de entrada y el nudo de simplificación NS. La expresión resultante para calcular la altura máxima en el nudo NS es.

$$Hmax_{ns} = Max(H_i - (R_i * Q_i^{1.85})) \quad (38)$$

donde:

- $Hmax_{ns}$ es la altura máxima que puede alcanzar el nudo de simplificación.
- H_i es la altura piezométrica del nudo de entrada/salida i .
- R_i es la resistencia generada por la línea i .
- Q_i es el caudal trasegado por la línea i .

Una vez obtenida esta altura máxima procedemos a obtener la resistencia mínima (K_{Min}) que deben tener cada una de las válvulas que sustituyen las entradas/salidas para que el nudo de simplificación no alcance una altura mayor que $Hmax$.

$$K_{min} = \frac{H_i - Hmax_{ns}}{Q^{1.85}} \quad (39)$$

donde:

- K_{min} es la resistencia mínima para cada una de las tuberías.
- H_i es la altura piezométrica del nudo i asociado al nudo base de las entradas y salidas.
- Q es el caudal original trasegado la tubería a sustituir.

Esta consideración asegura que la resistencia de cada válvula en las tuberías de entrada esté vinculada con la máxima altura piezométrica que puede alcanzar el nudo de simplificación NS. De esta manera, se logra una emulación precisa de la pérdida de carga generada por las tuberías originales que han sido eliminadas durante el proceso de simplificación.

Una vez obtenidos estos resultados preliminares, se ha observado que la combinación de consignas para las válvulas logra mantener la altura $H_{max_{ns}}$ dentro de los rangos requeridos. Sin embargo, no se garantiza que esta combinación de valores sea adecuada y suficiente para preservar la distribución de caudales del modelo original.

Para abordar esta situación, se ha implementado el método de optimización por Hooke & Jeeves. Este algoritmo se utiliza para encontrar la combinación óptima de consignas para las válvulas que permita mantener tanto la altura $H_{max_{ns}}$ como la distribución de caudales del modelo original. El método se basa en explorar el espacio de búsqueda iterativamente, ajustando las consignas de las válvulas en función de las restricciones y los objetivos establecidos.

El proceso de optimización por Hooke & Jeeves permite encontrar la configuración más adecuada y eficiente de las válvulas para mantener las condiciones hidráulicas deseadas en el nudo de simplificación NS y, al mismo tiempo, preservar la distribución de caudales en la red de distribución original. Con esto, se asegura que la simplificación no afecte negativamente el funcionamiento del sistema y se obtiene una solución óptima para la red simplificada.

3.4.2.1.2. ADAPTACIÓN DE HOOKE & JEEVES

El método desarrollado es una variante del algoritmo de Hooke & Jeeves, donde se delimitará una función objetivo que consistirá en minimizar el RMSE calculado entre el caudal trasegado por la tubería original y el trasegado por la válvula por la cual fue sustituida.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{li} - Q_{vi})^2}{n}} \quad (40)$$

donde:

- RMSE será la función objetivo y es la raíz del error medio cuadrático.
- Q_{li} es el valor de caudal trasegado por la línea original i .
- Q_{vi} es el caudal trasegado por la válvula i .
- n es el número de entradas y salidas del bloque.

Como punto de partida, se utilizarán los valores obtenidos por la Ecuación (42) que proporciona el valor mínimo de la consigna para las válvulas. A partir de estos valores mínimos, se procede a incrementar gradualmente la consigna hasta obtener un valor satisfactorio para la función objetivo. Sin embargo, este método presenta un rango de variación no delimitado, lo que puede dificultar la búsqueda óptima.

Para abordar este problema y delimitar el espacio de búsqueda en el algoritmo de Hooke and Jeeves, se propone realizar la búsqueda en función de la relación entre K_v y K_{v0} . Esta variable siempre se encuentra con valores entre 0 y 1, lo que nos permite evitar numerosos problemas en la búsqueda. Para llevar a cabo esto, debemos tener en cuenta las siguientes ecuaciones.

$$\tau = \frac{K_v}{K_{v0}} \quad (41)$$

$$K_{min} = \frac{1}{K_{v0}^2} \quad (42)$$

Al utilizar la relación τ entre K_v y K_{v0} como criterio de búsqueda, se restringe el espacio de soluciones y mejorar la eficiencia del algoritmo. Esto permite encontrar la combinación óptima de consignas para las válvulas que asegure tanto la estabilidad de la altura $H_{max_{ns}}$ como la preservación de la distribución de caudales en la red de distribución simplificada. Al delimitar el espacio de búsqueda, se obtienen soluciones más rápidas y efectivas para el problema de optimización.

En este trabajo, se ha empleado una búsqueda en función de τ para determinar los coeficientes de pérdidas necesarios en cada una de las N tuberías de entrada y/o salidas al bloque, de manera que se mantenga la distribución original de caudales en el modelo reducido. Se ha utilizado una longitud de paso llamada D , la cual después de cada iteración completa para las N variables se ve reducido en función de un valor delimitado por el usuario y un valor de control de parada, el cual será utilizado para comparar con la longitud de paso y continuar iterando mientras la longitud de paso sea mayor que el control de parada. Para los casos de estudio el valor de D se ve dividido entre 1,5 tras cada iteración y los coeficientes tomados para D y E son los siguientes:

1. $D = 0.05$

2. $E = 0.000001$

La aplicación de esta técnica de optimización ha permitido encontrar los valores óptimos de los coeficientes de pérdidas para cada tubería de entrada, asegurando que la repartición de caudales en el modelo simplificado sea lo más similar posible a la distribución original del modelo completo. La incorporación de estas técnicas de optimización representa un aspecto destacado del trabajo, ya que ha permitido mejorar la eficiencia y precisión en la búsqueda de soluciones que cumplan con los requisitos hidráulicos del sistema.

En conclusión, la búsqueda en función de τ y la implementación de técnicas de optimización han sido aspectos por destacar de este estudio, ya que han proporcionado una forma efectiva de encontrar los valores óptimos de los coeficientes de pérdidas, contribuyendo así a mantener la calidad hidráulica del modelo simplificado y garantizando una distribución adecuada de caudales en la red de distribución de agua. En la Figura 25. Se observa un diagrama de flujo de la adaptación del algoritmo de Hooke & Jeeves para este trabajo.

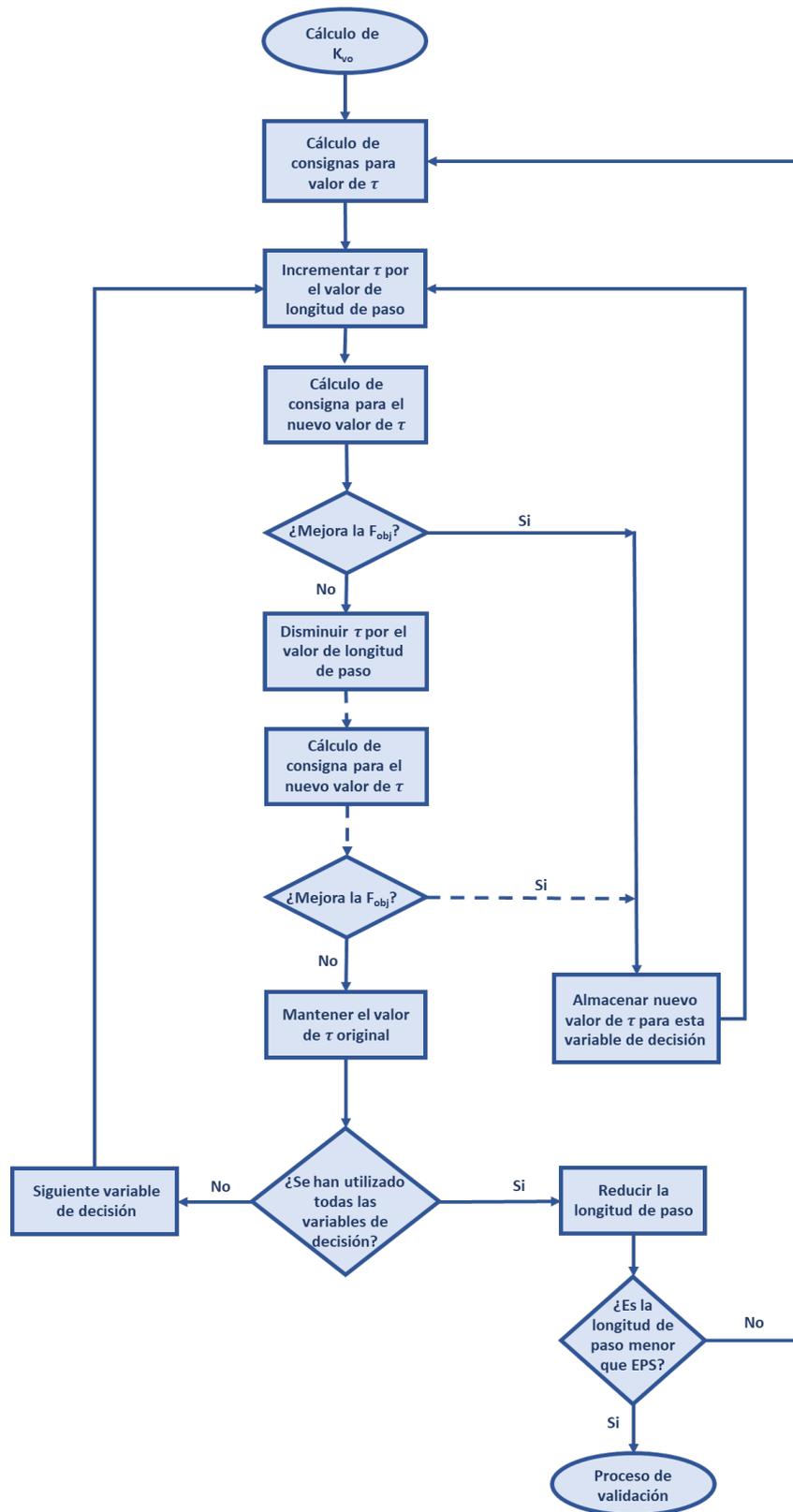


Figura 25. Diagrama de flujo de adaptación de algoritmo de Hooke & Jeeves.

3.4.2.1.3. APLICACIÓN DEL ALGORITMO

Para un mejor entendimiento del proceso de simplificación de este algoritmo se usará la misma red que para bloques terminales, la red de Balerna. en la Figura 26 se puede observar la red con los elementos de control seleccionados para este ejemplo y en la Tabla 13 podemos ver las características iniciales de la red.

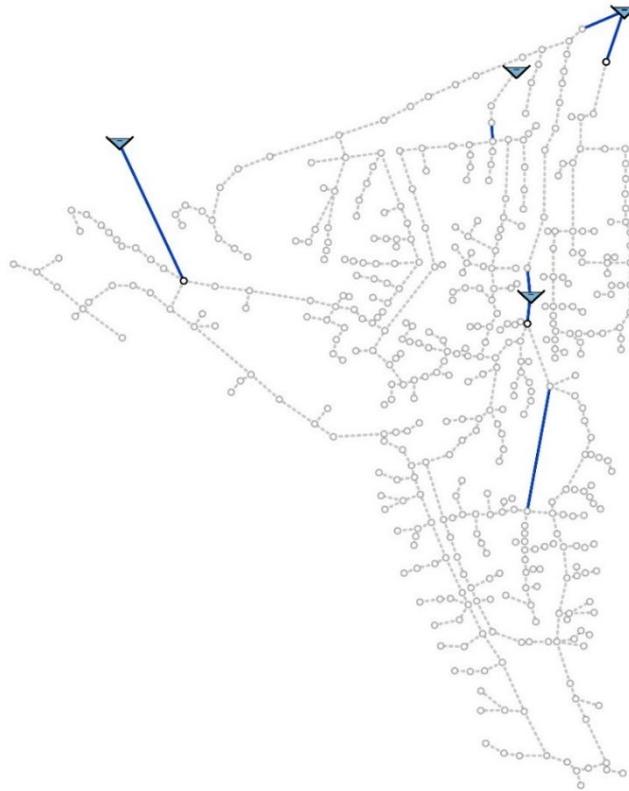


Figura 26. Elementos de control para la red Balerna.

Tabla 13 características de la red Balerna.

Número de Conexiones	443
Número de Embalses	4
Número de Depósitos	0
Número de Tuberías	454
Número de Bombas	0
Número de Válvulas	0
Demanda base total l/s	2453.1
Longitud Total de tuberías (Km)	100.26
Elevacion media de los nudos (m)	89

El algoritmo de simplificación ha llevado a cabo un proceso exhaustivo recorriendo el grafo de la red hasta encontrar una de las dos líneas de control previamente seleccionadas. A partir de esa línea de control, el algoritmo ha identificado y agrupado todos los elementos que conforman el primer bloque de la red. Luego, ha repetido el mismo proceso para encontrar el segundo bloque, partiendo de la primera línea de control que tenga uno de sus nodos adyacentes sin visitar.

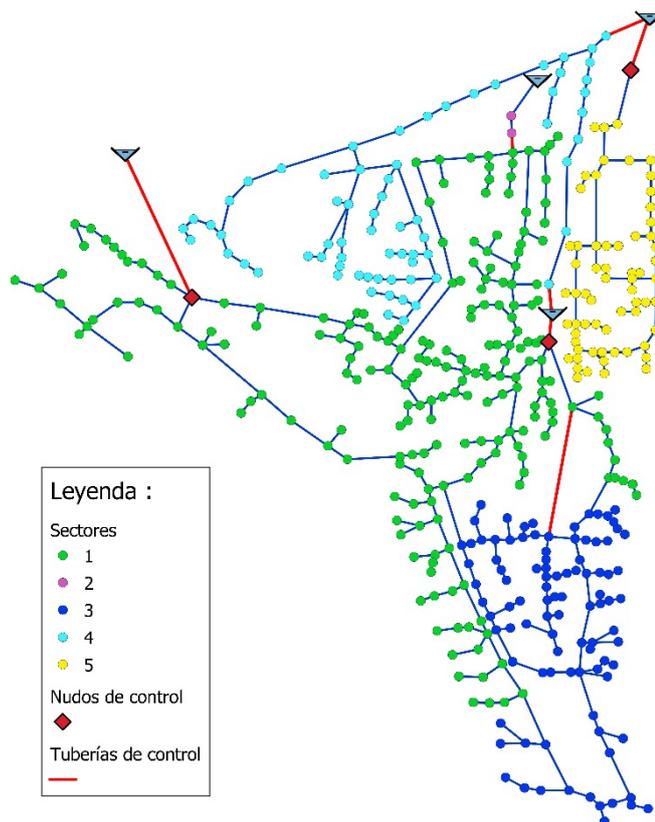


Figura 27. Red Balerma dividida en bloques.

Una vez que se han obtenido los bloques, el algoritmo pasa a la siguiente etapa, donde realiza una revisión para asegurarse de que no haya elementos como válvulas, depósitos, tanques u otros que puedan afectar significativamente la simplificación del bloque. El objetivo es encontrar un bloque que sea adecuado para ser simplificado sin comprometer el funcionamiento óptimo del sistema. Este proceso de identificación y revisión asegura que la simplificación se realice de manera efectiva y sin afectar negativamente el comportamiento hidráulico de la red. Es un paso

fundamental para garantizar que la simplificación sea exitosa y que el resultado final sea una red simplificada que mantenga las características hidráulicas esenciales del modelo original.

Una vez identificado un bloque candidato para la simplificación, el algoritmo procede a sustituir todos los elementos de este bloque por un único nudo de simplificación, y las entradas/salidas se reemplazan con válvulas Figura 29. Durante este proceso, se conserva la demanda y elevación de los nudos, y se obtienen las características del nuevo nudo y las válvulas que representan las tuberías originales. El nudo de simplificación adquiere la suma de las demandas originales de las tuberías de entrada y salida mientras que las válvulas se ajustan para emular las pérdidas de carga generadas por las tuberías reemplazadas y trasegar el mismo caudal.

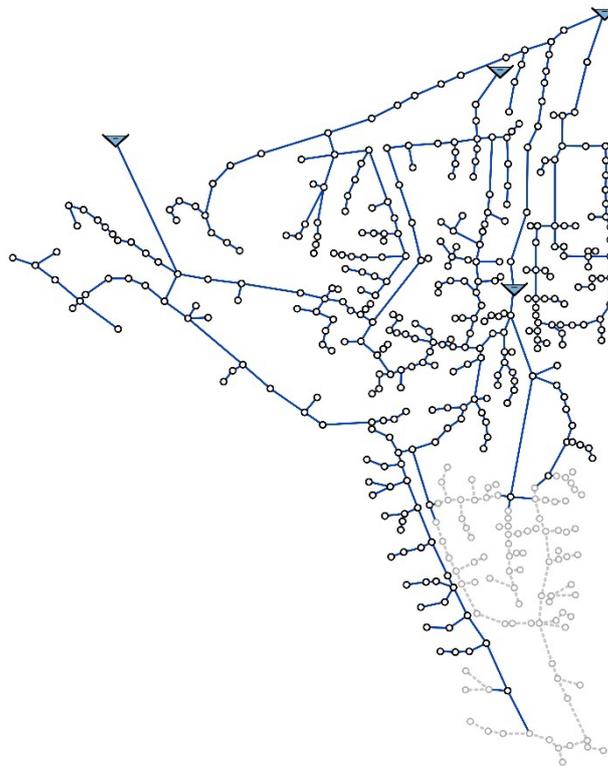


Figura 28. Identificación de bloque a simplificar.

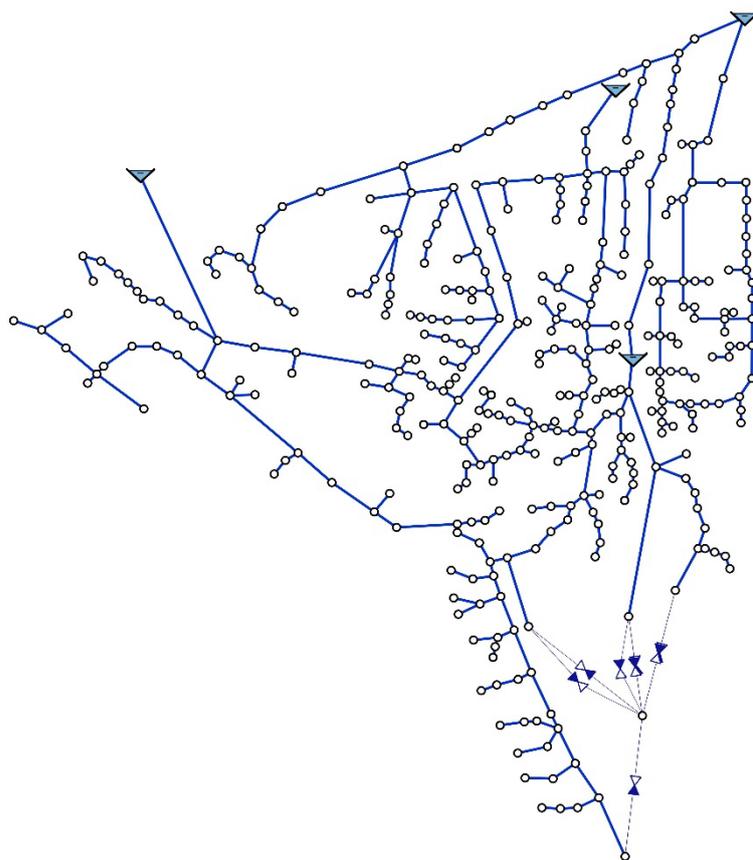


Figura 29. sustitución de tuberías de entrada y salida de bloque a simplificar por válvulas.

Tabla 14 características del bloque a simplificar.

Características del bloque	Valor	Unidad
Núm. Nudos	91	Ud.
Núm. Tuberías	96	Ud.
Longitud Total de tuberías	19.61	Km
Demanda base total	2453.1	L/s

A cada válvula se le ha calculado un valor de consigna en función de la pérdida generada por la tubería que está sustituyendo, en la tabla podemos observar los valores calculados y el error generado antes de la aplicación del algoritmo de Hooke & Jeeves.

Tabla 15 Simplificación inicial de bloques con múltiples entradas y salidas.

Original			Simplificación Inicial		
ID	Diámetro (mm)	Caudal (L/s)	Diámetro (mm)	Caudal (L/s)	Consigna K
119	113	3.96	113	1.62	22597.6
94	113	3.47	113	1.52	451.96
96	113	10.25	113	2.75	138.05
75	113	0.92	113	4.52	88.38
4	285	132.23	285	161.87	11.56
38	126	35.94	126	26.16	17.23

Se puede observar en la Tabla 15 cómo existe una gran diferencia entre los caudales originales de entrada/salida del bloque y los obtenidos al calcular los valores de consigna de las válvulas. La búsqueda de los valores óptimos para las válvulas se realiza mediante el método de optimización por Hooke & Jeeves. Esto garantiza que la distribución de caudales en el nuevo nudo de simplificación se asemeje a la distribución original en el bloque, manteniendo así el comportamiento hidráulico cercano al modelo original. De esta manera, la simplificación se efectúa reduciendo el bloque completo a un único nudo y dos válvulas, preservando las características hidráulicas esenciales de la red y asegurando que el sistema mantenga un funcionamiento adecuado como se puede apreciar en la Tabla 16.

Tabla 16 optimización por Hooke & Jeeves del bloque.

Original			Simplificación Hookes & Jeeves		
ID	Diámetro (mm)	Caudal (L/s)	Diámetro (mm)	Caudal (L/s)	Consigna K
119	113	3.96	113	2.61	4349.65
94	113	3.47	113	0.19	2.295E+14
96	113	10.25	113	9.85	138.05
75	113	0.92	113	0.84	88.3937
4	285	132.23	285	132.83	100.5935
38	126	35.94	126	36.9	50.74

Este caso de aplicación demuestra la validez y efectividad de la metodología propuesta, la cual se puede aplicar a cualquier RDA. El enfoque automático de identificación de bloques y la utilización de técnicas de optimización garantizan que el proceso de simplificación sea eficiente y preciso. Al mantener las características hidráulicas del sistema original, la simplificación resultante representa una representación adecuada de la red de distribución, lo que permite obtener resultados confiables y precisos en comparación con el modelo original.

Esta metodología ofrece una herramienta valiosa para la simplificación de RDAs, lo que puede ser de gran utilidad en diversos contextos, como análisis de sistemas complejos, optimización de redes y planificación de infraestructuras de agua. Al mantener la validez hidráulica del modelo simplificado, los resultados obtenidos siguen siendo representativos y confiables, lo que proporciona una base sólida para la toma de decisiones y la gestión eficiente de la red de distribución.

3.5. ETAPAS DE LA SIMPLIFICACIÓN

El diagrama completo de la metodología utilizada para la presentación de este proyecto se puede dividir en 3 etapas, En la primera etapa Figura 30 se permite al usuario una primera vista de la red, asignar los elementos de control y los parámetros de simplificación descritos en capítulos anteriores, el programa almacena los valores de caudal y presión con los cuales se validará cualquier simplificación que el usuario desee realizar en las demás etapas.



Figura 30. Primera etapa de la metodología de simplificación.

En la segunda etapa de la simplificación Figura 31 se implementa un contador que registra la suma total de elementos presentes en la red original, tanto nodos como líneas. Este enfoque se emplea para mantener un seguimiento exhaustivo de si alguno de los algoritmos ha generado una

oportunidad de simplificación que podría ser aprovechada por otro de los algoritmos en el proceso. De esta manera, se establece un control interno que permite optimizar la secuencia de ejecución de los algoritmos y maximizar la eficiencia de la simplificación global.

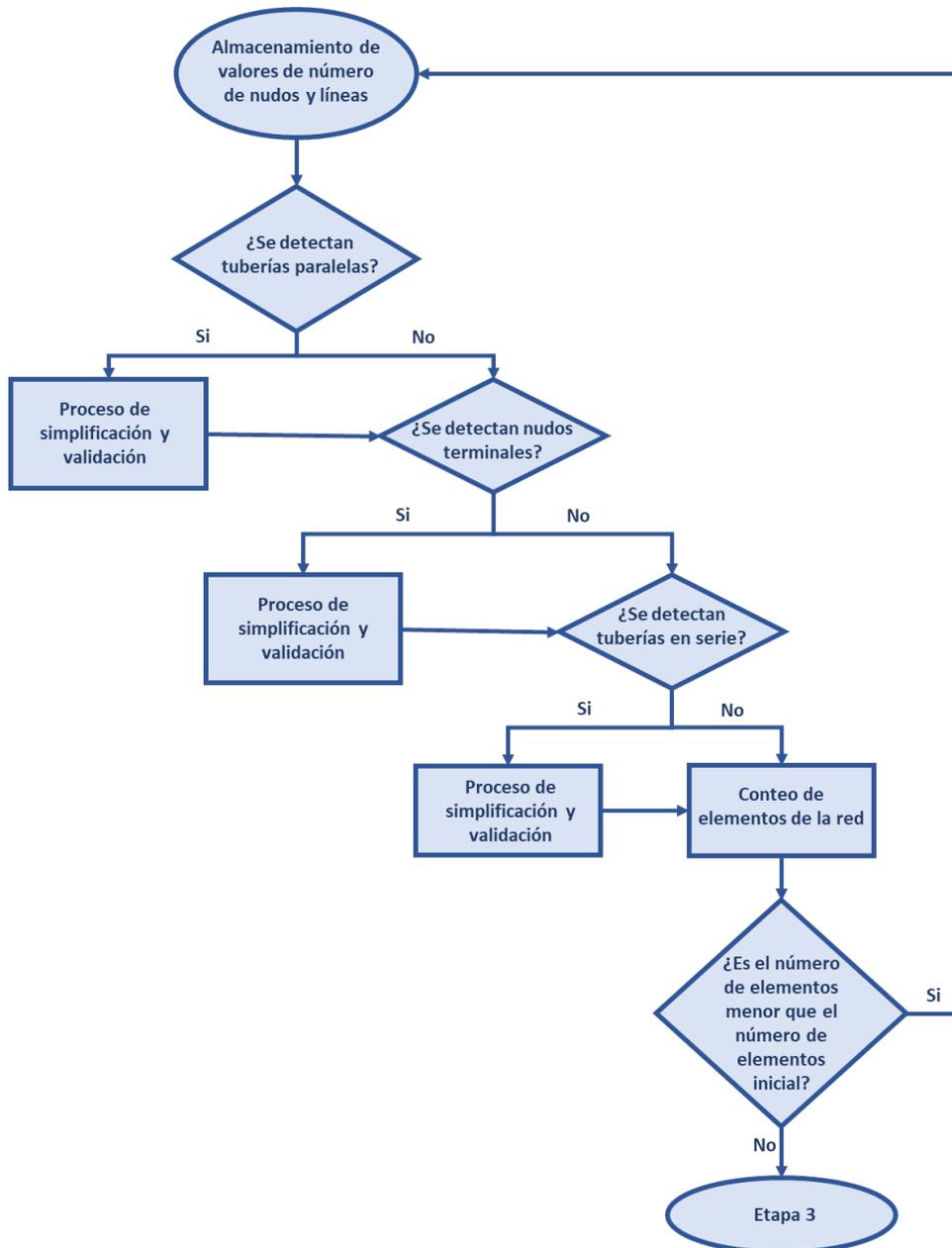


Figura 31. Segunda etapa de la metodología de simplificación.

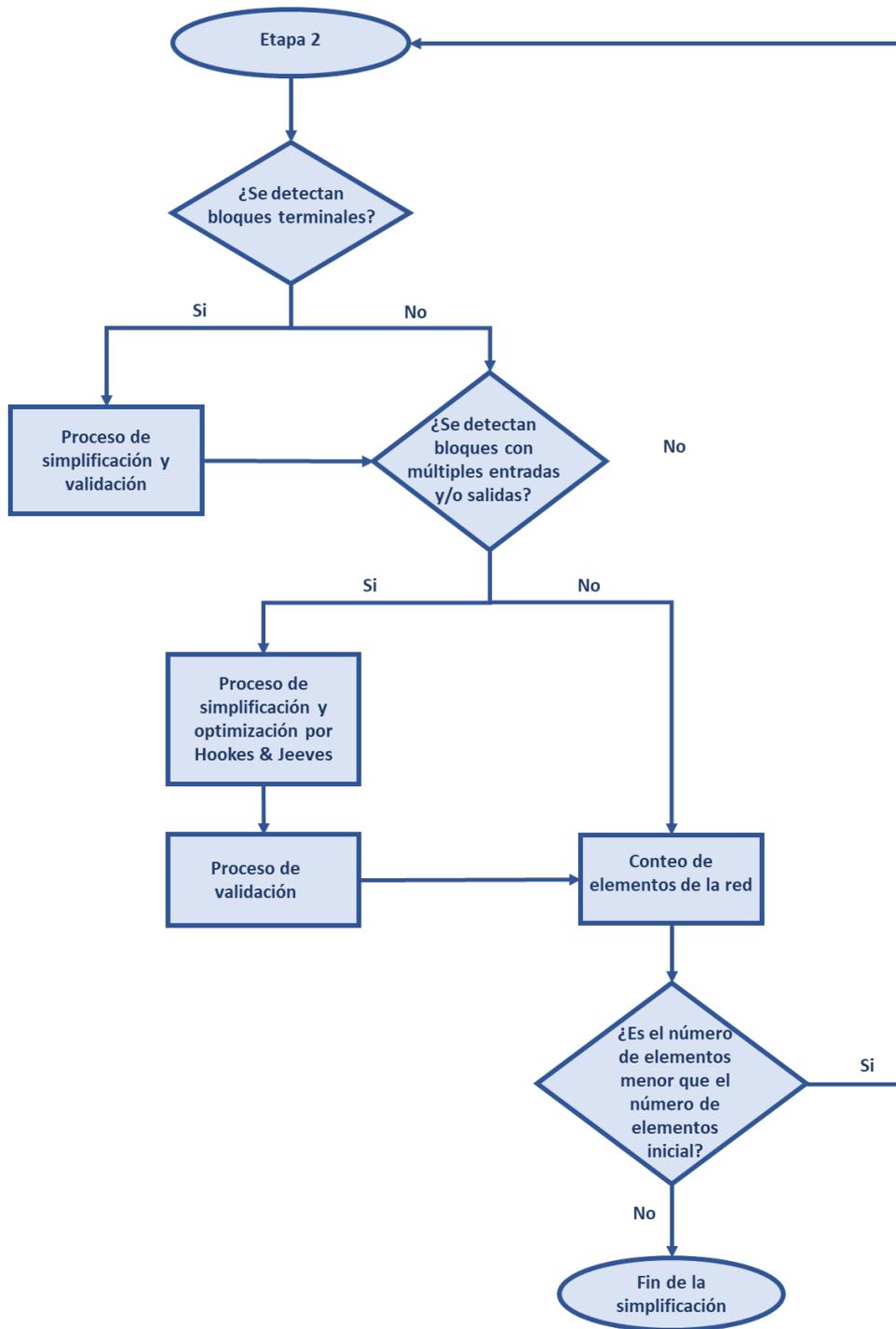


Figura 32. Tercera etapa de la metodología de simplificación.

Los algoritmos de simplificación descritos anteriormente se han desarrollado de manera flexible para adaptarse a las necesidades del usuario, pudiendo ser utilizados individualmente o en combinación. Aunque no existe un orden predefinido, se han obtenido mejores resultados en cuanto a la velocidad computacional de la metodología con el proceso descrito anteriormente. Para

comprender esto hace falta comprender las diferentes interacciones existentes entre los diferentes algoritmos, que son las siguientes:

1. Simplificación de tuberías paralelas: Es altamente recomendable emplear este algoritmo como el primero en caso de utilizar múltiples algoritmos de simplificación. La lógica detrás de esta sugerencia radica en que, al simplificar las tuberías paralelas, se puede lograr un mayor grado de simplificación en los algoritmos subsiguientes. Un ejemplo ilustrativo es el caso de dos tuberías que conectan un nudo A con un nudo B, y el nudo B no tiene otras tuberías que se desprendan de él. Si se aplica inicialmente el algoritmo de simplificación de tuberías paralelas, será posible identificar esta configuración y simplificarla. Sin embargo, si se opta por aplicar primero el algoritmo de nudos terminales, es probable que no se identifique la situación de dos tuberías paralelas debido a que el nudo B tiene dos entradas. En resumen, al utilizar el algoritmo de tuberías paralelas como punto de partida, se maximiza la eficacia de los algoritmos posteriores al reconocer configuraciones simplificables que de otro modo podrían pasarse por alto.
2. Simplificación de nudos terminales: El algoritmo de simplificación que implica la eliminación de nudos terminales y la reubicación de la demanda en un nudo base se considera más directo en comparación con la simplificación de nudos intermedios. Por tanto, es recomendable llevar a cabo esta simplificación antes que la de nudos intermedios y bloques terminales. Esta secuencia se sugiere debido a que la simplificación de nudos terminales tiende a tener un impacto menor en la red de distribución en comparación con otros enfoques. Además, al implementar esta simplificación en primer lugar, se allana el camino para la identificación más eficaz de candidatos adecuados para los algoritmos subsiguientes. Esta estrategia contribuye a una simplificación secuencial más coherente y eficiente en términos de los cambios realizados en la red de distribución de agua.
3. Simplificación de tuberías en serie: Entre los algoritmos de la etapa 2, este en particular tiene el potencial de generar la mayor disparidad entre la red original y la red simplificada. Debido a esta posibilidad, se recomienda su aplicación después de llevar a cabo las dos simplificaciones anteriores. Además, para mitigar los riesgos asociados con posibles alteraciones en elementos críticos de la red, se establecen ciertas limitaciones, como la diferencia de diámetros, la demanda base máxima del nodo y la diferencia de rugosidad, que están diseñadas para asegurar que los cambios efectuados no comprometan la

integridad y el rendimiento hidráulico de la red. Este enfoque progresivo y cauteloso permite una simplificación más controlada y precisa, evitando cambios bruscos que podrían afectar negativamente la funcionalidad de la red de distribución de agua.

4. Simplificación de bloques terminales: Es importante resaltar que este algoritmo implica un consumo computacional más elevado en comparación con el algoritmo de nudos terminales. Aunque la eliminación previa de los nudos terminales no es un requisito obligatorio, su eliminación anticipada puede acelerar significativamente el proceso. Además, el resultado de este algoritmo representa un bloque terminal como un único nudo consolidado, que puede coincidir con un nudo terminal detectado previamente por el algoritmo de nudos terminales. La decisión de cuánto simplificar dependerá enteramente del usuario, ofreciendo así un grado de control flexible sobre el nivel de simplificación deseado.
5. Simplificación de bloques con múltiples entradas y/o salidas: Este algoritmo se caracteriza por demandar un mayor poder computacional, principalmente debido a la incorporación de la optimización mediante el método de Hooke & Jeeves. Sin embargo, su eficiencia se ve significativamente mejorada por los procesos de simplificación previos. En la mayoría de los casos, estos procesos reducirán el número de conexiones de entrada y salida en el bloque, lo que a su vez disminuirá la cantidad de variables de decisión que deben ser optimizadas. Esta reducción en la complejidad del problema optimización contribuye a agilizar el proceso y a mejorar el rendimiento general del algoritmo. En resumen, la combinación de simplificaciones anteriores con el método de optimización Hooke & Jeeves otorga una ventaja sustancial a este algoritmo, permitiendo una búsqueda más eficiente y precisa de soluciones óptimas.

Es importante tener en cuenta que la selección y el orden de aplicación de los algoritmos de simplificación pueden variar según las características y requerimientos específicos de cada sistema de distribución de agua por lo tanto debe estudiarse con mayor profundidad la diferencia de simplificaciones obtenidas por diferentes órdenes y sus respectivos errores. Se recomienda ajustar el uso de estos algoritmos de acuerdo con las particularidades de cada caso.

3.6. PUNTOS DE CONTROL Y VALIDACIÓN DE LA SIMPLIFICACIÓN

Después de cada paso de simplificación, es importante evaluar si mantener o eliminar los elementos simplificados tiene un impacto significativo en el comportamiento hidráulico de la red. En lugar de comparar individualmente cada elemento de la red simplificada, se sugiere delimitar un conjunto de elementos, tanto nodos como tuberías, para evaluar su influencia en el sistema.

En este enfoque, se establecen criterios y límites que definen la importancia de los elementos en función de parámetros hidráulicos relevantes, como la presión, el flujo, la capacidad de transporte, entre otros. Se establecen umbrales aceptables para estos parámetros y se evalúa si la eliminación de los elementos propuestos en la simplificación supera estos umbrales.

Esto implica una evaluación semi global del comportamiento hidráulico de la red simplificada, considerando el impacto acumulativo de los elementos eliminados en los elementos de control esparcidos por la red. Se pueden realizar análisis de sensibilidad y simulaciones computacionales para comparar los resultados de la red original y la red simplificada en diferentes escenarios operativos.

Al delimitar un conjunto de elementos para evaluar su impacto, se puede tomar en cuenta la conectividad, las características físicas de las tuberías, la demanda asociada a los nodos, la relevancia funcional de los elementos en la red, entre otros factores. Esto permite una evaluación más eficiente y precisa del impacto de la simplificación en el comportamiento hidráulico general de la red.

Es importante destacar que este enfoque basado en la evaluación de un conjunto de elementos delimitados ayuda a garantizar que la simplificación no produzca cambios significativos en el comportamiento hidráulico de la red, manteniendo la confiabilidad y la eficiencia operativa del sistema de distribución de agua.

4. CASOS DE ESTUDIO Y RESULTADOS

A continuación, se presentarán 3 diferentes casos de estudio, de tres redes con topologías y tamaño de elementos muy diferentes, con la finalidad de estudiar la capacidad de identificación y simplificación de los algoritmos automáticos desarrollados, comparación hidráulica entre la red original y la simplificada y los efectos de los puntos de control a la hora de la simplificación.

4.1. C-TOWN

En el presente caso de estudio, se examina la red de distribución de agua de C-Town La red utilizada en la "Battle of Background Leakage Assessment for Water Networks (BBLAWN)"(Ostfeld et al., 2012) fue seleccionada como parte de la 16ª edición del congreso Water Distribution System Analysis, que tuvo lugar en la ciudad de Bari, Italia. La red cuenta con las características mostradas en la Tabla 17.

Tabla 17. características de la red C-town.

Núm Conexiones	399
Núm Embalses	1
Núm Depósitos	7
Núm tuberías	443
Núm bombas	11
Núm válvulas	5
Longitud de tuberías (km)	60.41
Altura promedio de los nudos(m)	99.75

4.1.1. DIÁMETRO ADMISIBLE VS RUGOSIDAD ADMISIBLE

El análisis de influencia se lleva a cabo mediante la aplicación de un proceso de simplificación idéntico en la red de estudio, manteniendo constante la situación inicial y los elementos de control, pero variando los valores adoptados para un parámetro específico. A través de este enfoque iterativo, en el cual se ejecuta el proceso para múltiples valores de un mismo parámetro, se busca determinar la sensibilidad de la esqueletización de la red respecto al valor seleccionado para dicho parámetro.

4.1.1.1. DIFERENCIA DE DIÁMETRO ADMISIBLE.

Para ilustrar este enfoque, la red de distribución de agua en C-town. exhibe una notoria variabilidad en sus diámetros de tubería, abarcando desde un mínimo de 51 mm hasta un máximo de 610 mm. El diámetro promedio de las tuberías en esta red se sitúa en 190 mm.

Al llevar a cabo un análisis de sensibilidad en la red de C-town respecto a las modificaciones en los diámetros de las tuberías, se puede obtener información crucial sobre el impacto de este parámetro en la simplificación de la red y en su comportamiento hidráulico integral.

Este análisis se llevará a cabo considerando valores máximos de diferencia de rugosidad admisible (100%) y teniendo en cuenta la demanda base máxima seleccionada para este caso de estudio, que es de 6 l/s.

A través de este proceso iterativo, se obtendrá una comprensión más precisa de cómo las variaciones en los diámetros de las tuberías influyen en la simplificación de la red y si estas variaciones tienen una repercusión significativa en las propiedades hidráulicas y operativas del sistema. Esto proporcionará información clave para tomar decisiones informadas en relación con la optimización y simplificación de la red basadas en los valores de los diámetros de las tuberías.

El proceso se realizó fijando la diferencia de presión admisible y diferencia de caudal admisible en un 10%, valor el cual es adaptable por el usuario, luego se fijó el valor de diferencia de rugosidad admisible al 100% para anular este parámetro y se realizaron 5 simplificaciones con diferencia de diámetro admisible desde el 20% hasta el 100% como se puede apreciar en la Tabla 18 y la Figura 33.

Tabla 18. Comparativa diferencia de diámetro admisible C-town.

$\Delta\varnothing_{adm}$ (%)	ΔP_{adm} (%)	ΔQ_{adm} (%)	Nudos Simpli	Líneas Simpli	RMSE	%Elim nudos	%Elim Tuberías
20	9	9	158	199	0.002505	61.2%	56.6%
40			147	188	0.00256	63.9%	59.0%
60			139	176	0.005009	65.8%	61.7%
80			138	175	0.005021	66.1%	61.9%
100			138	175	0.005021	66.1%	61.9%

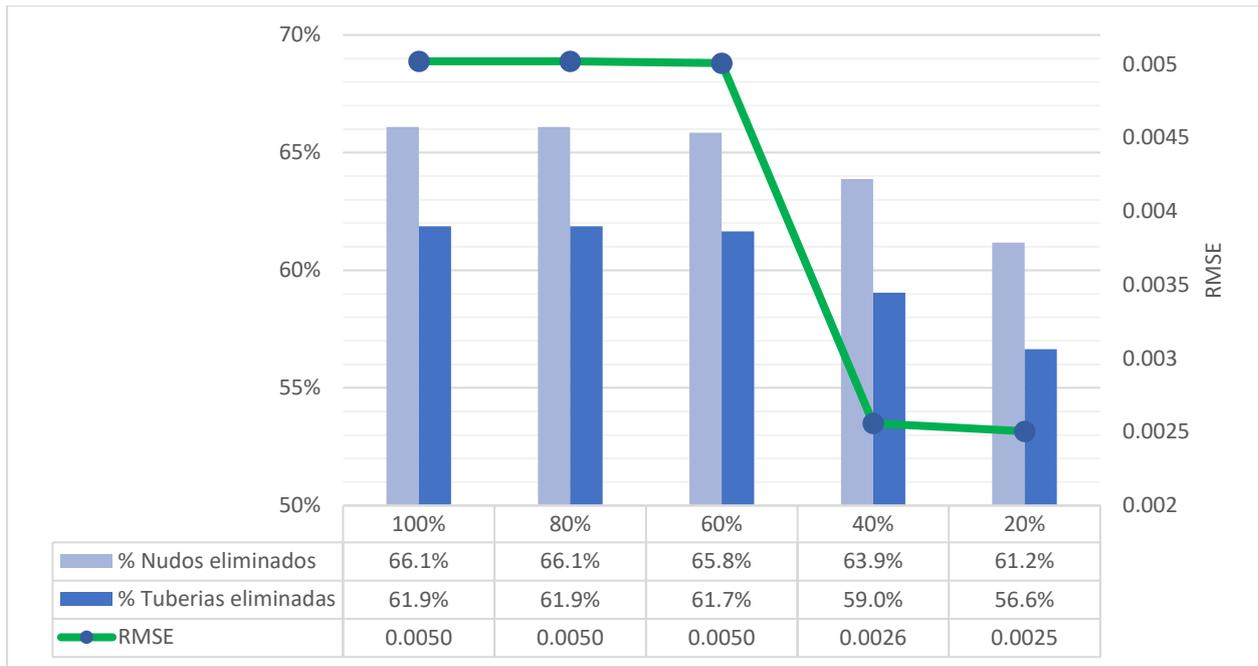


Figura 33. Comparativa de resultados para diferencia de diámetros admisibles.

4.1.1.2. DIFERENCIA DE RUGOSIDAD ADMISIBLE

Para demostrar este enfoque, la red de distribución de agua en C-town, exhibe una marcada variabilidad en sus coeficientes de Hazen Williams, oscilando entre un mínimo de 60 y un máximo de 139, con un coeficiente promedio de 92.35.

Al emprender el análisis de la sensibilidad de la red de C-town frente a variaciones en los valores de rugosidad de las tuberías, se conseguirá información esencial acerca del impacto de este parámetro en el proceso de simplificación de la red y en su comportamiento hidráulico global.

Este análisis se realizará empleando valores extremos de diferencia de diámetro admisible (100%) y considerando la demanda base máxima elegida para este caso de estudio, que es de 6 l/s.

A través de estas iteraciones, se comprende mejor cómo los cambios en la rugosidad de las tuberías afectan la simplificación de la red y si estos cambios tienen un efecto significativo en las características hidráulicas y operativas del sistema. Este análisis contribuirá a tomar decisiones informadas sobre la optimización y simplificación de la red en función de los valores de rugosidad de las tuberías.

El proceso se realizó fijando la diferencia de presión admisible y diferencia de caudal admisible en un 10%, valor el cual es adaptable por el usuario, luego se fijó el valor de diferencia de diámetro

admisible al 100% para anular este parámetro y se realizaron 5 simplificaciones con diferencia de rugosidad admisible desde el 20% hasta el 100% como se puede apreciar en la Tabla 19 y la Figura 34.

Tabla 19. Comparativa de simplificaciones con diferente % de rugosidad admisible en la red C-town

ΔP_{adm} (%)	ΔQ_{adm} (%)	ΔR_{ugadm} (%)	Nudos Simpli	Líneas Simpli	RMSE	%Elim nudos	%Elim Tuberías
9	9	100	138	175	0.005021	66.09%	61.87%
		80	138	175	0.005021	66.09%	61.87%
		60	138	175	0.005021	66.09%	61.87%
		40	138	175	0.005021	66.09%	61.87%
		20	145	182	0.0048	64.37%	60.35%

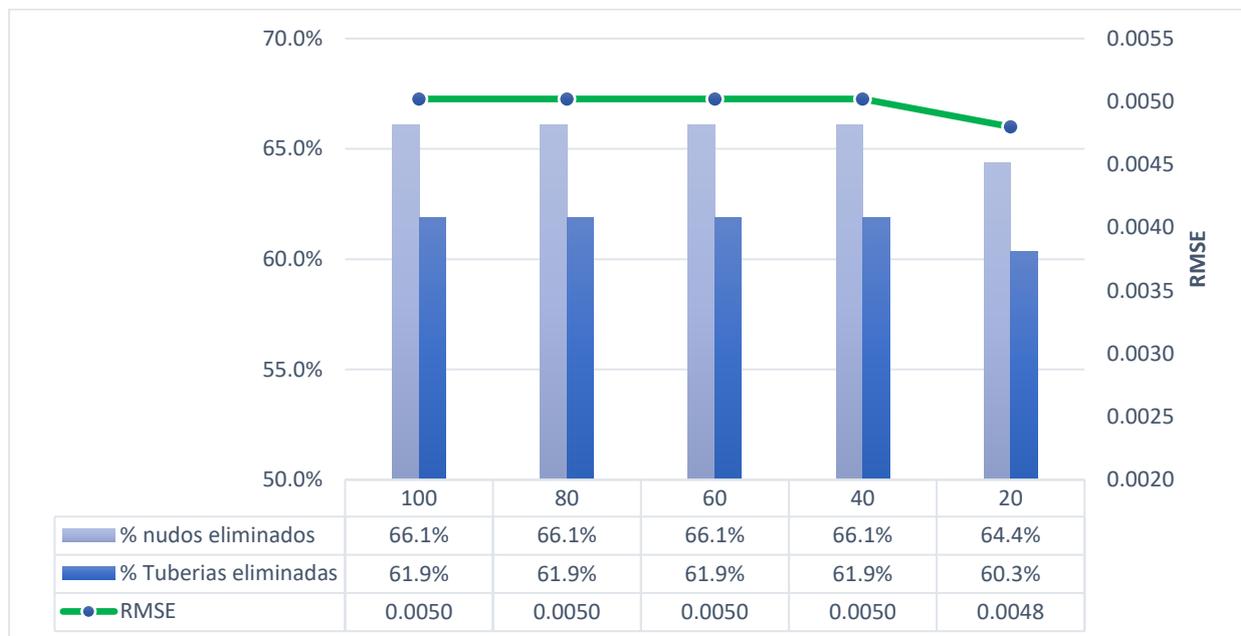


Figura 34. Comparativa de resultados para diferencia de rugosidad admisible.

4.1.2. RESULTADOS DE LA SIMPLIFICACIÓN

Para mostrar los resultados de la simplificación se hará un enfoque en la red con los parámetros más permisivos, 100% diferencia de diámetro, 100% diferencia de coeficiente de Hazen Williams

y 6 demanda base. Para la simplificación se han seleccionado los elementos de control señalados en la Figura 35 los cuales servirán para la validación de la simplificación tras cada iteración.

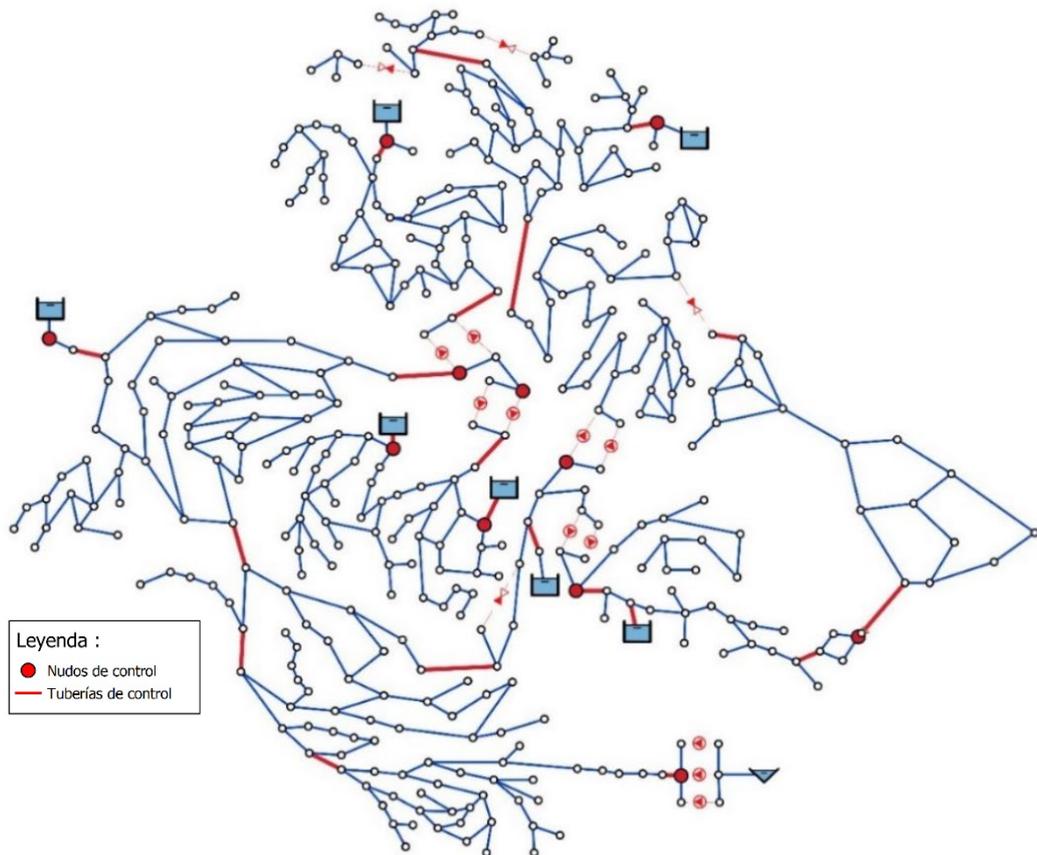


Figura 35. Elementos de control para la red C-town.

Con estos elementos de control se ha dividido en bloques la red como se muestra en la Figura 36. y se ha procedido a la simplificación a través de las 3 etapas descritas en el capítulo anterior, obteniendo como resultado las comparativas mostradas en las Tabla 20 y Tabla 21.

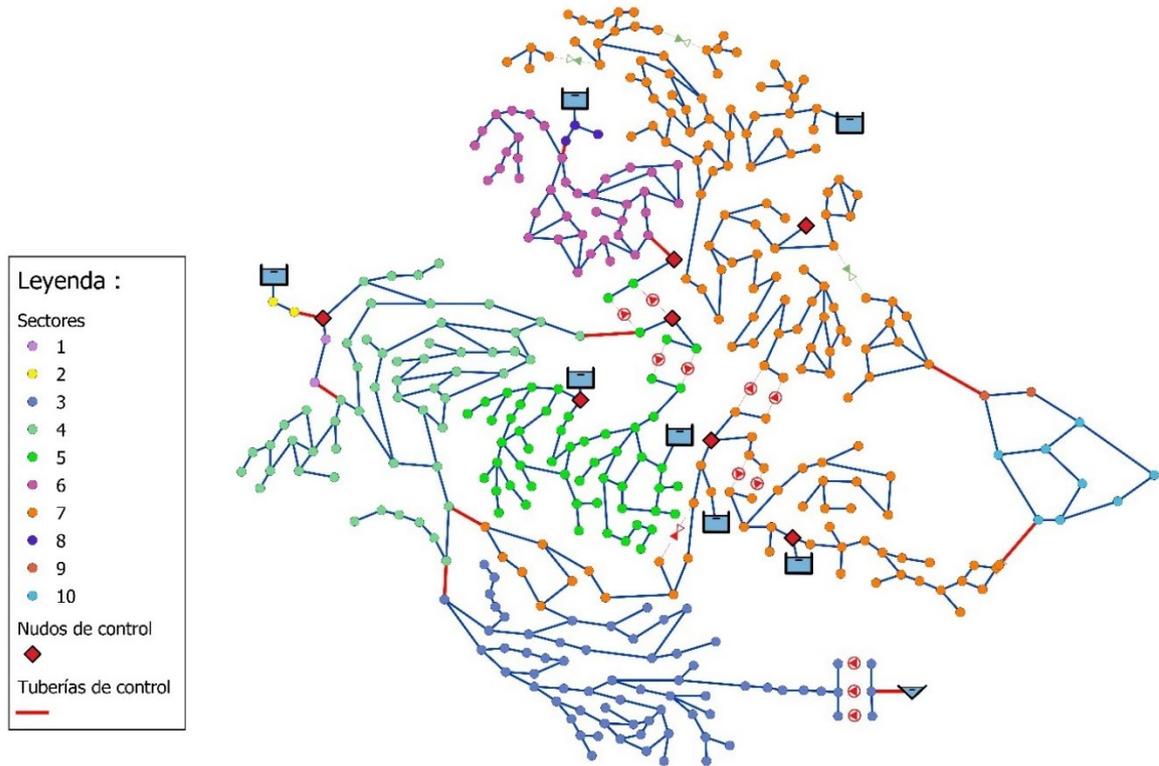


Figura 36. Division en sectores de la red C-town.

Tabla 20 Comparativa de alturas en elementos de control de la red C-Town

Elemento de control	Altura red original (m)	Altura Simpli (m)	Diferencia(m)
Conexión J269	89.9	88.87	1.03
Conexión J145	120.31	120.25	0.06
Conexión J289	65.01	64.93	0.08
Conexión J307	63.58	63.05	0.53
Conexión J301	63.75	63.23	0.52
Conexión J238	125.56	125.53	0.03
Conexión J382	107.12	107.17	-0.05
Conexión J64	106.85	106.85	0
Conexión J509	134.87	134.88	-0.01
Conexión J39	74.02	73.79	0.23
Conexión J297	104.48	104.48	0

Tabla 21 Comparativa de caudales en las líneas de control de la red C-Town.

Elementos de control	Caudal original (l/s)	Caudal Simplificado (l/s)
Tubería P445	100.71	94.57
Tubería P752	-2.21	-2.45
Tubería P424	30.92	30.77
Tubería P397	66.84	66.43
Tubería P409	35.92	35.66
Tubería P86	-27.43	-28.12
Tubería P791	-29.39	-29.36
Tubería P763	-2.28	-2.28
Tubería P787	16.5	16.47
Tubería P348	-14.13	-13.44
Tubería P144	1.43	1.52
Tubería P17	155.91	140.36
Tubería P13	-60.4	-75.38
Tubería P1036	14	14
Tubería P1045	-9.16	-8.9
Tubería P310	196.56	200.37
Tubería P34	171.83	159.24
Tubería P287	-10.4	-4.4
Tubería P19	42.41	27.02
Tubería P243	-12.76	-12.76

En cuanto a la topología de la red simplificada, se puede apreciar en la Figura 37 el gran nivel de simplificación de la red, donde los únicos nudos terminales que se encuentran son los precedidos por una válvula o algún elemento de control, por otra parte los bloques terminales que eran ramificaciones de la tubería principal se observa que fueron simplificados en su totalidad, y de los bloques encontrados por el algoritmo, se logró la simplificación de 3 de ellos, que además de cumplir con no tener dentro elementos de control o indispensables para la red, su simplificación no generó un impacto grave para la red. En la Figura 38 se observan los elementos conservados de la red original de C-town, los tramos disconexos de la red son donde se han creado tramos de tuberías equivalentes para la sustitución de las tuberías en serie y tuberías paralelas o sustitución por válvulas para los bloques de múltiples entradas, en esta se puede apreciar el nivel de simplificación alcanzado por la metodología.

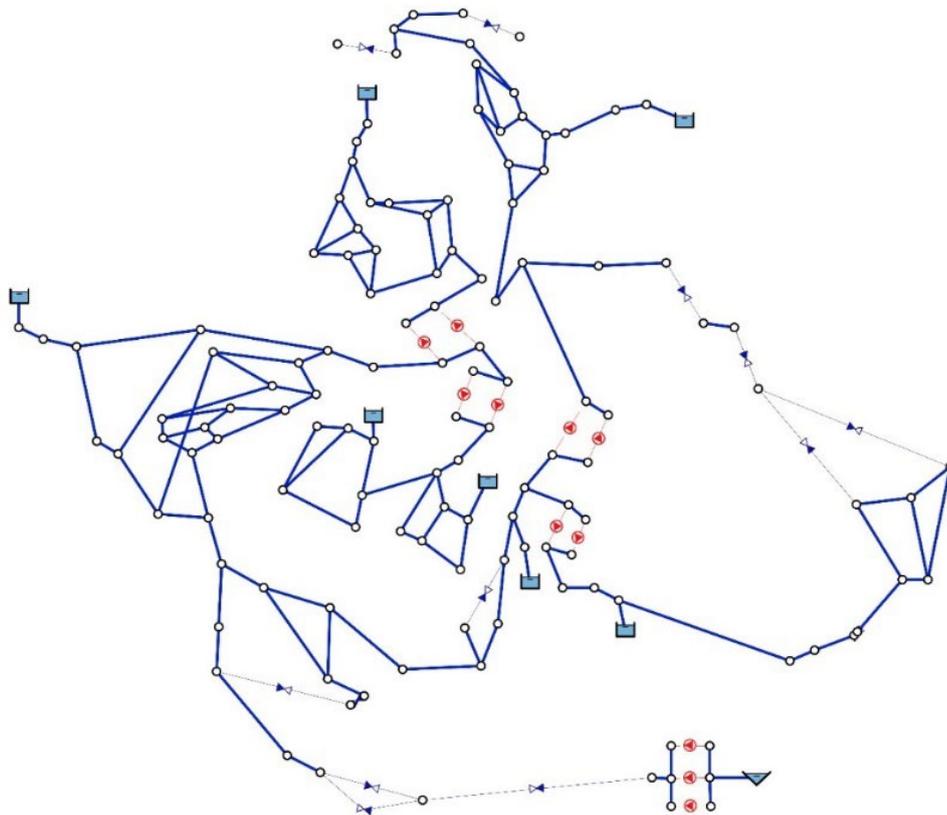


Figura 37. Red C-town simplificada.

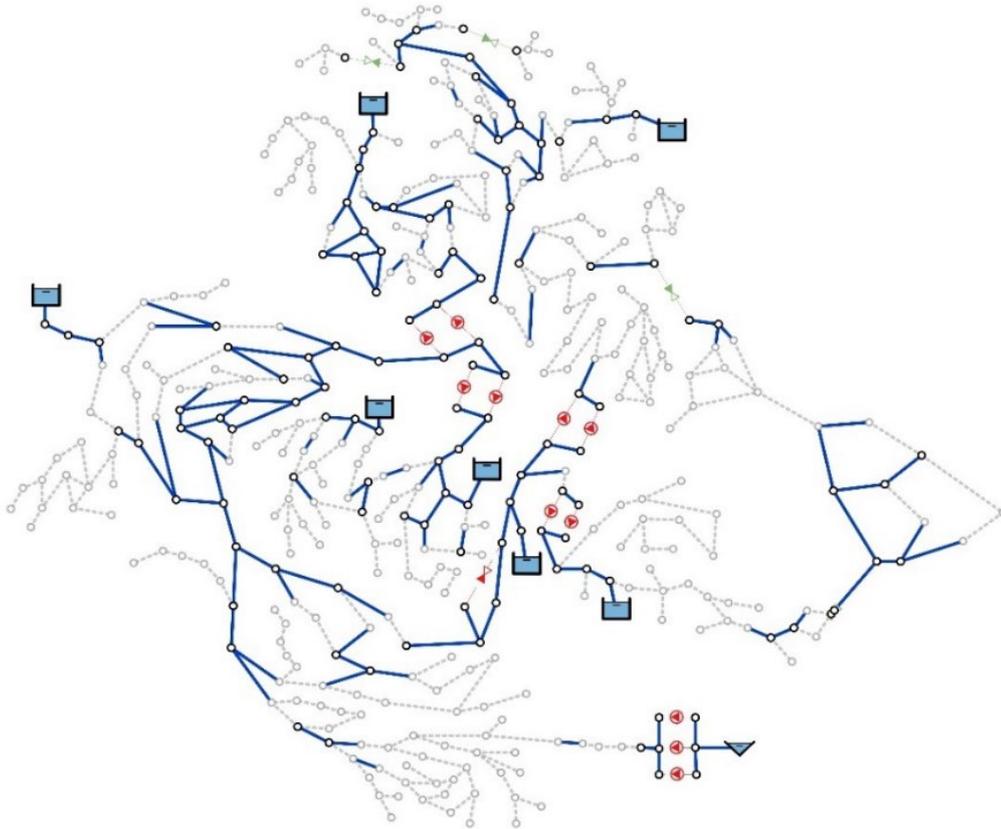


Figura 38. Elementos conservados de la red original C-town.

4.2. WOLF CORDERA

En el presente caso de estudio, se examina la red de distribución de agua en Wolf Cordera Ranch (WCR). Esta urbanización ocupa un área de 9,7 km² y exhibe una demanda media diaria estimada de 44953 metros cúbicos al día. El modelo hidráulico que describe la infraestructura de WCR incluye un total de 1985 tuberías, 6 válvulas y 5 bombas. En su estructura predominante, se observa una preponderancia de tuberías con un diámetro de 203 mm. En cuanto a los nodos, la red comprende 1782 conexiones y se abastece a través de 4 embalses estratégicamente ubicados.

Tabla 22. Características de la red Wolf Cordera Ranch.

Característica	Valor
Número de Conexiones	1782
Número de Embalses	4
Número de Depósitos	0
Número de Tuberías	1985
Número de Bombas	6
Número de Válvulas	4
Demanda base total (l/s)	523.58
Elevación media de los nudos (m)	2232.09
Longitud de tuberías (km)	117

La selección de los elementos de control a incorporar en el proceso de simplificación de la RDA dependerá tanto de las características intrínsecas de la red como de los propósitos específicos para los cuales se utilizará el modelo simplificado resultante. En este contexto, particularmente enfocado en un análisis académico, el objetivo primordial es lograr un nivel óptimo de esqueletización de la red, manteniendo simultáneamente la integridad del comportamiento hidráulico inherente al modelo original.

Dada la diversidad de combinaciones posibles en cuanto a los valores a ser implementados, se realiza un análisis metódico y exhaustivo de la influencia que ejercen los parámetros y elementos de control en cuestión. La finalidad de este análisis es obtener una comprensión más profunda y detallada sobre cómo estas variables inciden en el proceso de simplificación de la red. El propósito último consiste en identificar la configuración que mejor se adapte a los objetivos perseguidos, proporcionando una visión comprensiva y precisa de las implicaciones de cada elección en el resultado de la simplificación.

4.2.1. IMPACTO DE LOS PARÁMETROS EN LA SIMPLIFICACIÓN

El análisis de influencia se lleva a cabo mediante la aplicación de un proceso de simplificación idéntico en la red de estudio, manteniendo constante la situación inicial y los elementos de control, pero variando los valores adoptados para un parámetro específico. A través de este enfoque iterativo, en el cual se ejecuta el proceso para múltiples valores de un mismo parámetro, se busca determinar la sensibilidad de la esqueletización de la red respecto al valor seleccionado para dicho parámetro.

La red correspondiente a Wolf Cordera Ranch presenta un rango de diámetros que va desde un mínimo de 154 mm hasta un máximo de 609 mm, con un diámetro promedio de 203.2 mm. En términos de rugosidad, los coeficientes de Hazen-Williams varían entre 118 y 126. En este contexto, la diferencia de rugosidad no será considerada como un parámetro de relevancia. Con relación a los nodos, la demanda base promedio es de 0.3 l/s. A lo largo de este análisis, se explorarán los resultados obtenidos al permitir la combinación de las demandas de los nodos, abarcando valores desde 6 veces el promedio (2 l/s) hasta 20 veces la demanda promedio (6 l/s).

4.2.1.1. DIFERENCIA DE DIÁMETROS ADMISIBLE

La diferencia admisible de diámetros ($\Delta\varnothing_{adm}$) constituye uno de los dos criterios topológicos esenciales en el proceso de simplificación de nudos intermedios. Este criterio determina la viabilidad de combinar las tuberías en serie en función de las disparidades en sus diámetros. Con el fin de evaluar el impacto de este parámetro, para eso se ha fijado el valor de diferencia de rugosidad admisible al 100% anulando este parámetro y se examinarán cinco valores de diferencia de diámetro que abarcan desde el 20% hasta el 100%. Específicamente, el último valor mencionado elimina por completo el criterio de diferencia de diámetros. La red cuenta con 1786 nudos iniciales, comprendiendo estos las conexiones, embalses y depósitos, además cuenta con 1995 líneas, considerando dentro de estas las tuberías, válvulas y bombas. En la Tabla 23 y en la Figura 39 se pueden observar los resultados obtenidos para los diferentes escenarios de actuación seleccionados.

Tabla 23. Comparativa de simplificaciones con diferente % de diferencia de diámetro admisible en la red Wolf Cordera Ranch.

$\Delta\varnothing_{adm}$ (%)	DBmax (lps)	ΔP_{adm} (%)	ΔQ_{adm} (%)	ΔR_{ugadm} (%)	Nudos Simpli	Líneas Simpli	RMSE	%Elim nudos	%Elim Tuberías
20	6	9	9	100	336	507	0.00013684	81.2%	74.6%
40	6				309	477	0.001504	82.7%	76.1%
60	6				306	474	0.0014486	82.9%	76.2%
80	6				306	474	0.0014486	82.9%	76.2%
100	6				306	474	0.0014486	82.9%	76.2%

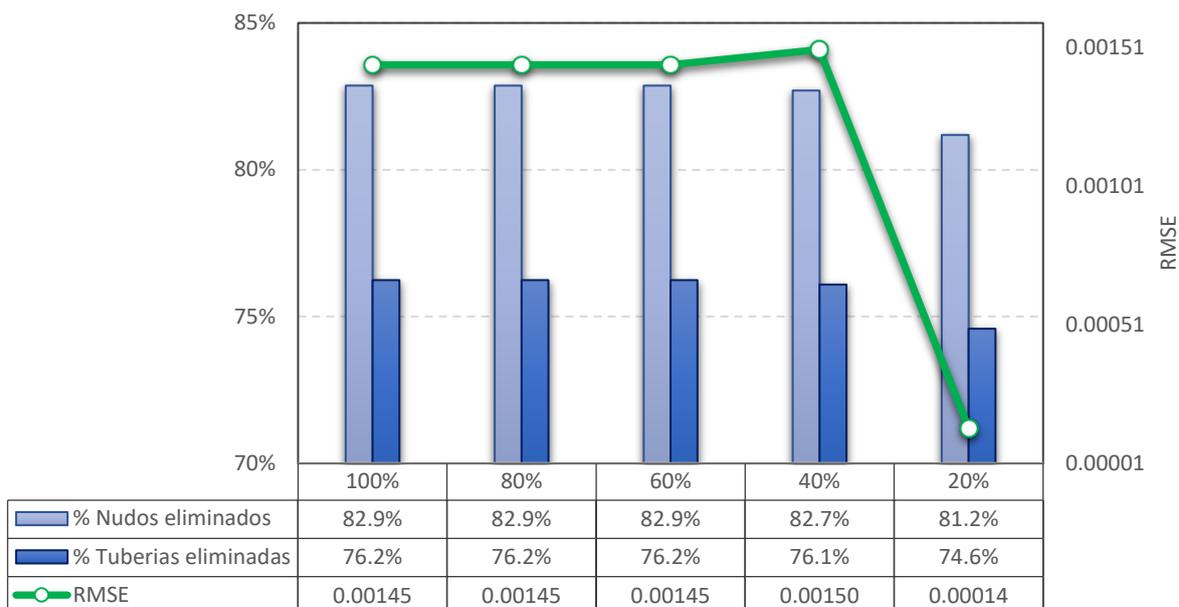


Figura 39. Comparativa de diferencia de diámetro admisible en la simplificación de la red Wolf Cordera Ranch.

4.2.1.2. DEMANDA BASE MÁXIMA ADMISIBLE

Otra restricción que puede ser establecida por el usuario es la demanda base máxima permitida en un nudo que será objeto de simplificación. Para explorar su influencia, se analizará no solo el nivel de simplificación logrado con distintas demandas, sino también el error resultante generado por estos diversos criterios. En estos escenarios se cuenta igual con 1786 nudos y 1995 líneas, se fija tanto el valor de diferencia de diámetro como de rugosidad en 100%, el último debido a la poca diferencia que existe entre el coeficiente de Hazen Williams máximo y mínimo de la red y como se ve en la Tabla 24 y en la Figura 40 se realizan diferentes simplificaciones para 5 demandas máximas admisibles.

Tabla 24 Comparación de resultados para diferentes demandas base máxima admisible

$\Delta\varnothing_{adm}$ (%)	DBmax (lps)	ΔP_{adm} (%)	ΔQ_{adm} (%)	ΔR_{ugadm} (%)	Nudos Simpli	Líneas Simpli	RMSE	%Elim nudos	%Elim Tuberías
100	6	9	9	100	306	474	0.0014486	82.87%	76.24%
100	5				308	476	0.001245	82.75%	76.14%
100	4				307	474	0.00086456	82.81%	76.24%
100	3				312	481	0.000847	82.53%	75.89%
100	2				320	490	0.00017	82.08%	75.44%



Figura 40. Simplificación para diferentes demandas máximas admisibles de la red Wolf Cordera Ranch

4.2.1.3. RESULTADO DE LA SIMPLIFICACIÓN DE WOLF CORDERA RANCH

Para mostrar los resultados de la simplificación se hará un enfoque en la red con los parámetros más permisivos, 100% diferencia de diámetro, 100% diferencia de coeficiente de Hazen Williams y 6 demanda base. Para la simplificación se han seleccionado los elementos de control señalados en la Figura 41 los cuales servirán para la validación de la simplificación tras cada iteración y luego comparar los resultados obtenidos, estos elementos de control han hecho que se divida la red en diferentes sectores mostrados en la Figura 42.

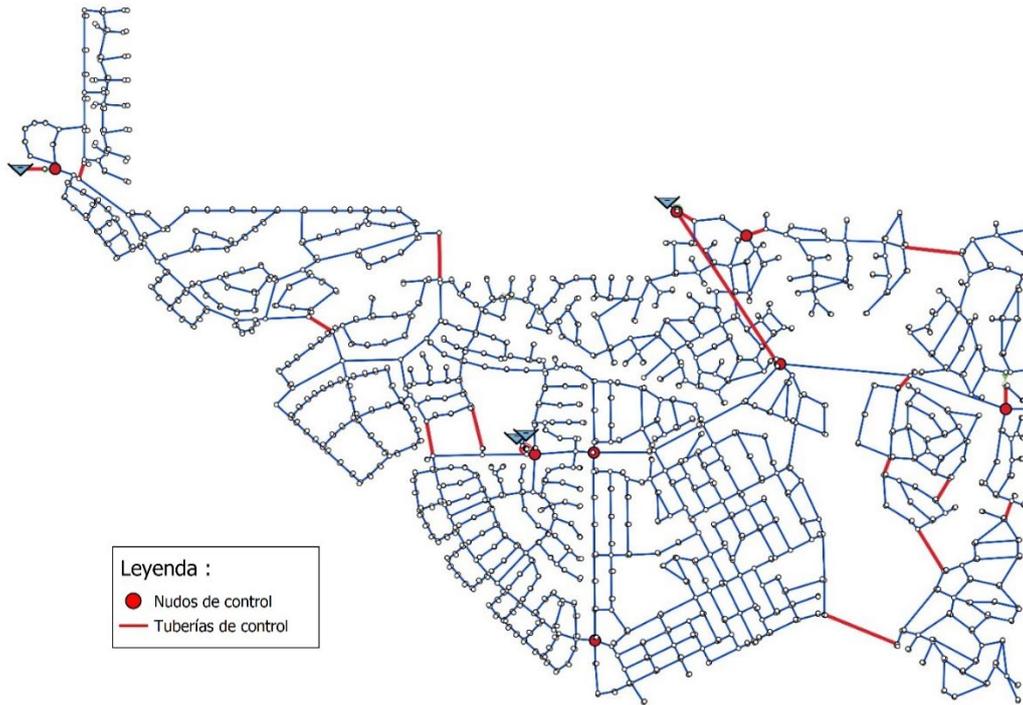


Figura 41. Elementos de control seleccionados para la red Wolf Cordera Ranch.

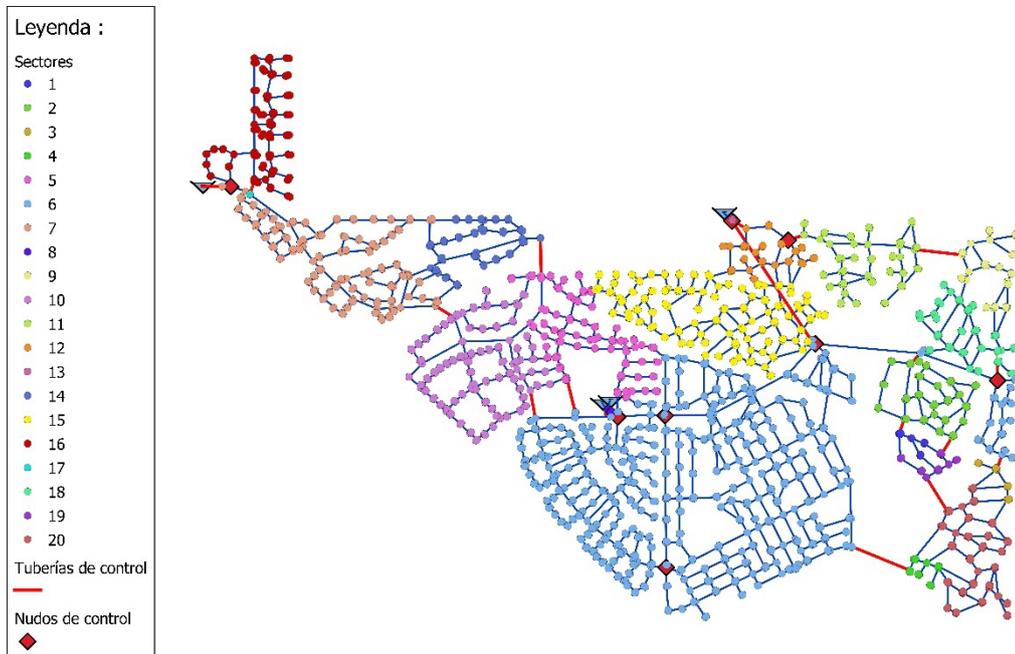


Figura 42. Division en sectores de la red Wolf Cordera Ranch.

Una vez realizada la recolección de datos de los elementos de control y división en sectores, se procedió a iterar por los diferentes algoritmos desarrollados, logrando una simplificación bastante significativa mientras se logra mantener un gran nivel de representación hidráulica, en la Figura 43 se pueden observar los elementos conservados de la red original en el modelo simplificado, como era de esperarse los elementos encontrados son parte del cuerpo principal de la RDA, en las zonas donde pareciese no existir un camino que conecte la red es debido a la sustitución de tuberías paralelas o tuberías en serie por un conducto equivalente, el cual es el que mantendría la conexión de la red o en caso de los bloques intermedios, estas tuberías han sido sustituidas por válvulas que mantengan la similitud hidráulica, como se puede observar en la Figura 44.

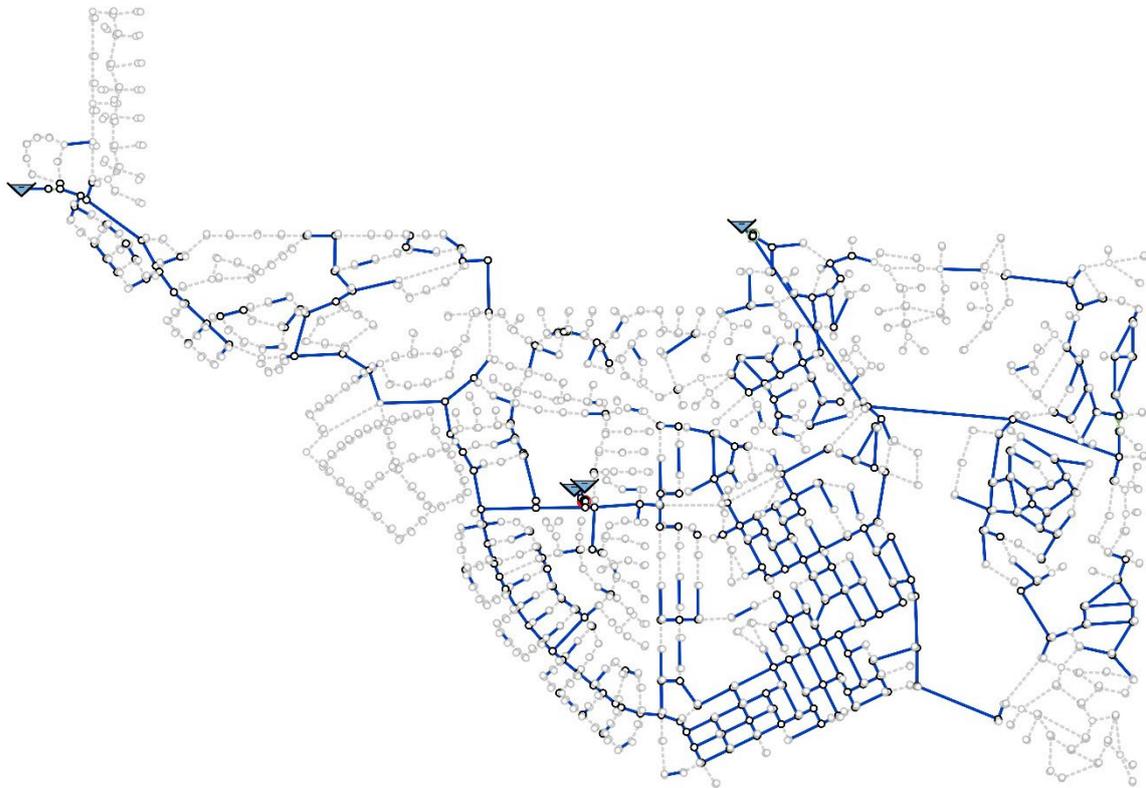


Figura 43. Elementos que se mantienen de la red original de Wolf Cordera Ranch.

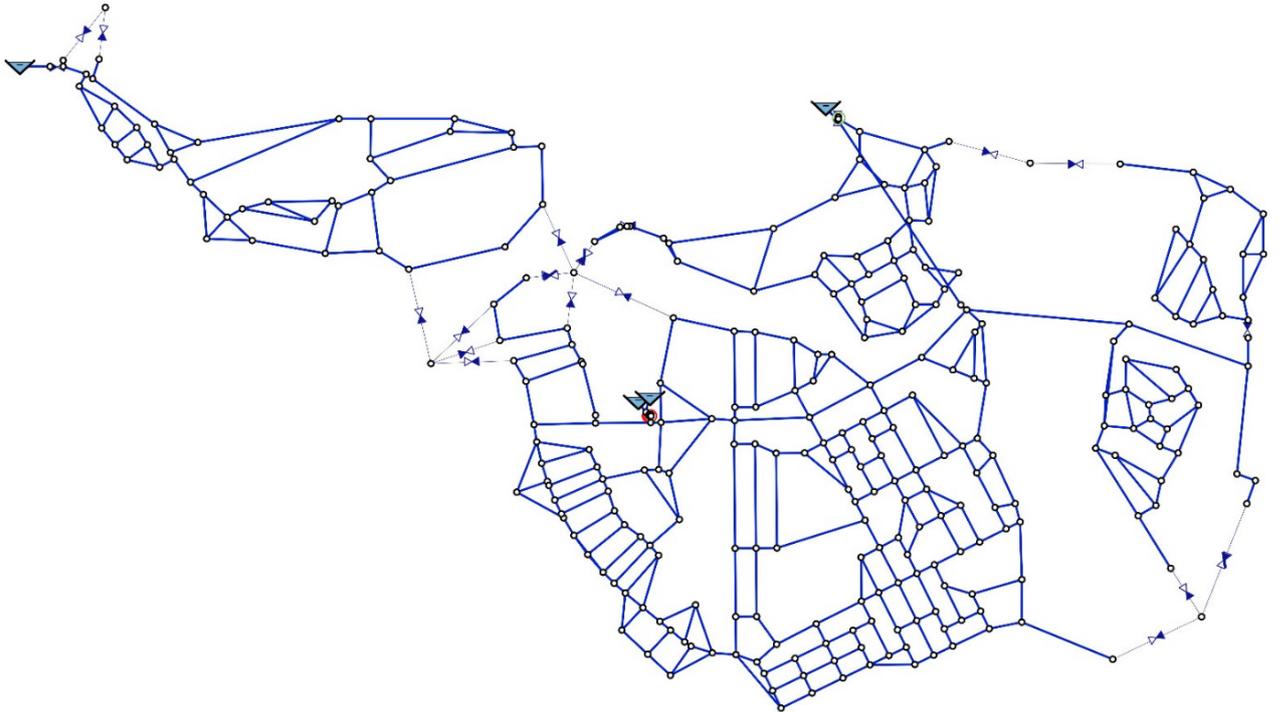


Figura 44. topología de la red simplificada Wolf Cordera Ranch.

Una vez visto la diferencia en la topología de la red, se debe estudiar si el modelo simplificado mantiene las características de la red original, para esto se realizará una comparativa de las alturas de los nudos de control como se puede observar en la Tabla 25 en la que se puede observar que la altura de los elementos de control apenas experimenta cambios significativos, presentando una diferencia máxima puntual de tan solo 0.75 metros. y en cuanto a las líneas de control se pueden observar en la Tabla 26, en relación con los caudales de la red, se puede observar que se ha identificado una diferencia de caudal que varía desde 41.31 a 32.68 l/s. Sin embargo, es importante resaltar que esta discrepancia es puntual y se ha mantenido un nivel excelente de concordancia en la predicción de caudales para el resto de las tuberías.

Tabla 25 Comparación de alturas de elemento de control en la red Wolf Cordera Ranch

Elementos de control	Altura original (m)	Altura Simplificada (m)
Conexión 1149	2224.67	2224.68
Conexión 6006	2225.58	2225.58
Conexión 6076	2225.48	2225.48
Conexión 6256	2224.47	2224.48
Conexión 6263	2224.76	2224.77
Conexión 12813	2223.71	2222.96
Conexión 61594	2227.82	2227.82
Conexión 61707	2265.21	2265.21

Tabla 26 Comparativa de caudales en elementos de control de la red Wolf Cordera Ranch.

Elementos de control	Caudal red original (l/s)	Caudal red Simplificada (l/s)
Tubería 2084	41.31	32.68
Tubería 2248	9.43	9.6
Tubería 7070	2.6	1.82
Tubería 7095	-12.9	-14.12
Tubería 7289	16.02	15.86
Tubería 7290	-16.43	-15.98
Tubería 7296	-7.85	-7.58
Tubería 7820	-43.03	-42.59
Tubería 7984	1.6	1.6
Tubería 21457	62.59	63.25
Tubería 21480	10.13	10.15
Tubería 21720	10.68	10.66
Tubería 21735	82.71	82.71
Tubería 21953	0.03	0.27
Tubería 22227	12.49	21.11
Tubería 71468	111.98	111.98
Tubería 71475	47.36	47.36
Tubería 71544	27.14	27.14
Tubería 71737	328.89	328.89
Tubería 80013	0	0

4.3. NJ1

4.3.1. IMPACTO DE LOS PARÁMETROS EN LA SIMPLIFICACIÓN

La red a tratar es la más grande de los casos de estudio y además es el caso de estudio seleccionado para la simulación y simplificación en régimen dinámico, el sistema NJ 1 se basa en el sistema de distribución de Dover Township, NJ, y fue utilizado por (Hoagland et al., 2015) , al igual que las anteriores redes se hará una comparativa entre diferentes simplificaciones realizadas con diferentes parámetros, las cuales se exponen a continuación.

4.3.1.1. DIFERENCIA DE DIÁMETRO ADMISIBLE

Para el parámetro de diferencia de diámetro admisible se harán 5 simplificaciones aumentando de en intervalos de 20% la diferencia de diámetro admitida, destacar que la red cuenta con 14987 nudos y 16066 líneas, para estas simplificaciones se mantendrá una demanda base igual a 6 l/s y una diferencia de rugosidad del 100%, esto se puede ver en la Tabla 27 y la Figura 45.

Tabla 27. Comparativa de simplificación con diferencia de diámetro en la red NJI.

$\Delta\text{Øadm}$ (%)	ΔPadm (%)	ΔQadm (%)	Nudos Simpli	Líneas Simpli	RMSE	%Elim nudos	%Elim Tuberías
20	9	9	1896	2678	0.0007	87.3%	83.3%
40			1569	2317	0.0012	89.5%	85.6%
60			1398	2125	0.0013	90.7%	86.8%
80			1442	2177	0.0011	90.4%	86.4%
100			1389	2115	0.0013	90.7%	86.8%

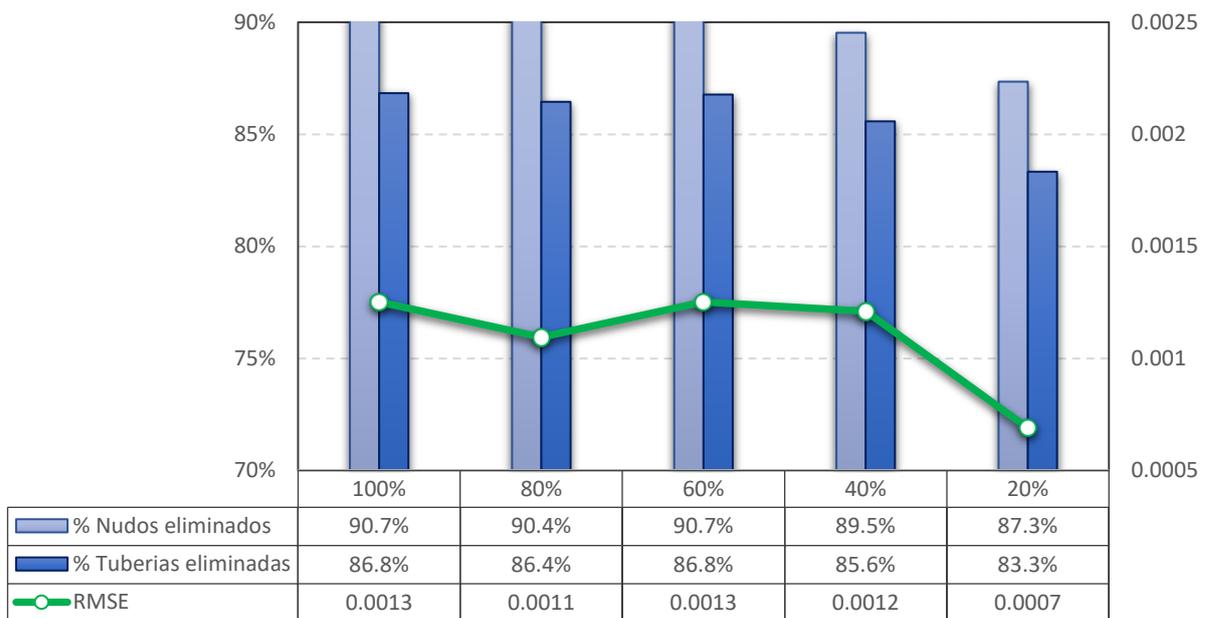


Figura 45. Comparativa de simplificación de la red NJI con diferentes diámetros admisibles.

Es evidente que a partir del umbral del 60%, apenas se logra incrementar el grado de simplificación, mientras que el error se mantiene constante. Esto sugiere que la red no presenta diferencias significativas en los diámetros de sus tuberías susceptibles de simplificación.

4.3.1.2. DEMANDA BASE MÁXIMA ADMISIBLE

Otra limitación que el usuario puede definir es la demanda base máxima permitida en un nodo que se someterá a simplificación. Para investigar su impacto, no solo se examinará el grado de simplificación alcanzado con distintas demandas, sino también se evaluará el error resultante

generado por estos diversos criterios, el cual se puede apreciar tanto en la Tabla 28 como en la Figura 46.

Tabla 28. Comparativa de las simplificaciones de la red NJ1 con diferentes demandas base máxima admisible.

DBmax (lps)	ΔP_{adm} (%)	ΔQ_{adm} (%)	Nudos Simpli	Líneas Simpli	RMSE	%Elim nudos	%Elim Tuberías
6	9	9	1389	2115	0.13%	90.73%	86.84%
5			1390	2116	0.19%	90.73%	86.83%
4			1392	2118	0.22%	90.71%	86.82%
3			1394	2120	0.23%	90.70%	86.80%
2			1405	2134	0.22%	90.63%	86.72%

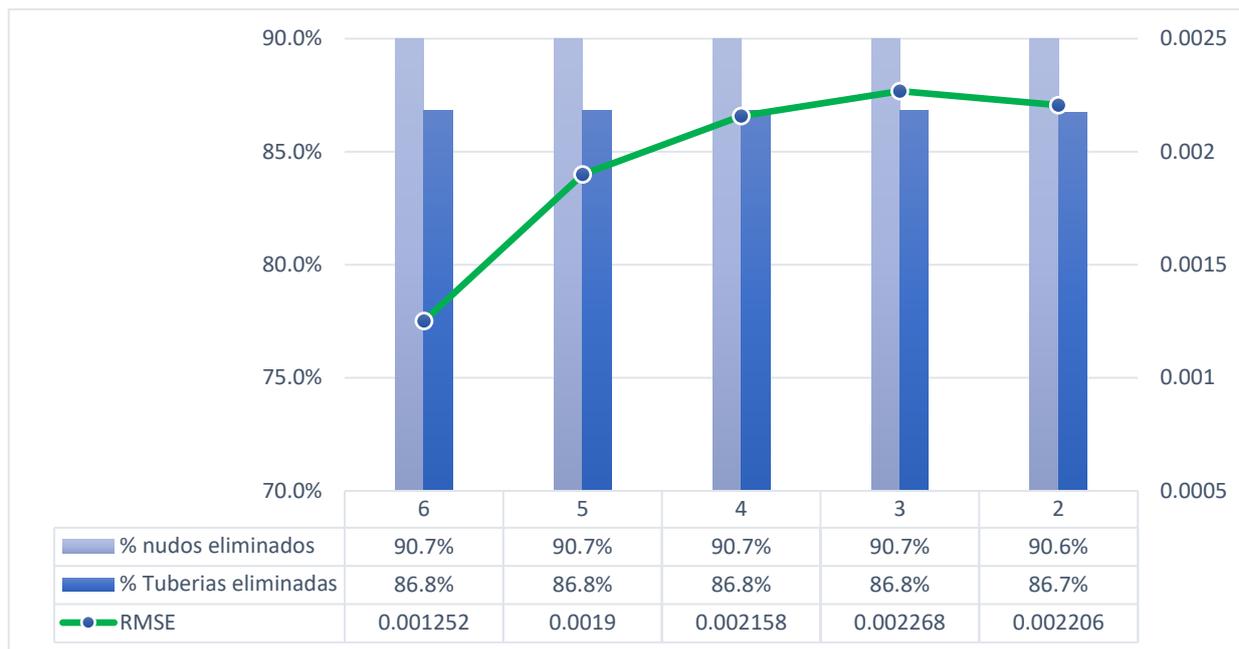


Figura 46. Comparativa de simplificación de la red NJ1 para diferentes demandas base máxima admisible.

Se observa algo curioso en esta simplificación y es que el error decrece a medida que la demanda base máxima admisible aumenta, en principio esto se debe al orden en el cual fue implementado la simplificación, debido a que teniendo antes tuberías paralelas y tuberías en serie que los bloques terminales, a medida que la demanda base es menor, estas dos se encargan de simplificar mayor cantidad de elementos y como se había descrito anteriormente, son susceptibles a los grandes cambios de demandas que tiene la red en sus diferentes horas, mientras que al aumentar las limitaciones de la demanda base, estas simplificaciones se llevaran a cabo con los algoritmos de nudos terminales o bloques terminales, y estos al tratarse de una simplificación que no afecta la red principal y que tienen menor efecto hidráulico en la simplificación permiten mantener un gran nivel de representación.

4.3.2. RESULTADO DE LA SIMPLIFICACIÓN

La simplificación de la red se ha hecho con parámetros máximos como única limitante la demanda base de 6 l/s y un RMSE de 2.5, en la Figura 47 se observan los elementos de control de la red y en las Tabla 29 y Tabla 30 se observan los resultados para la primera hora de la simulación.

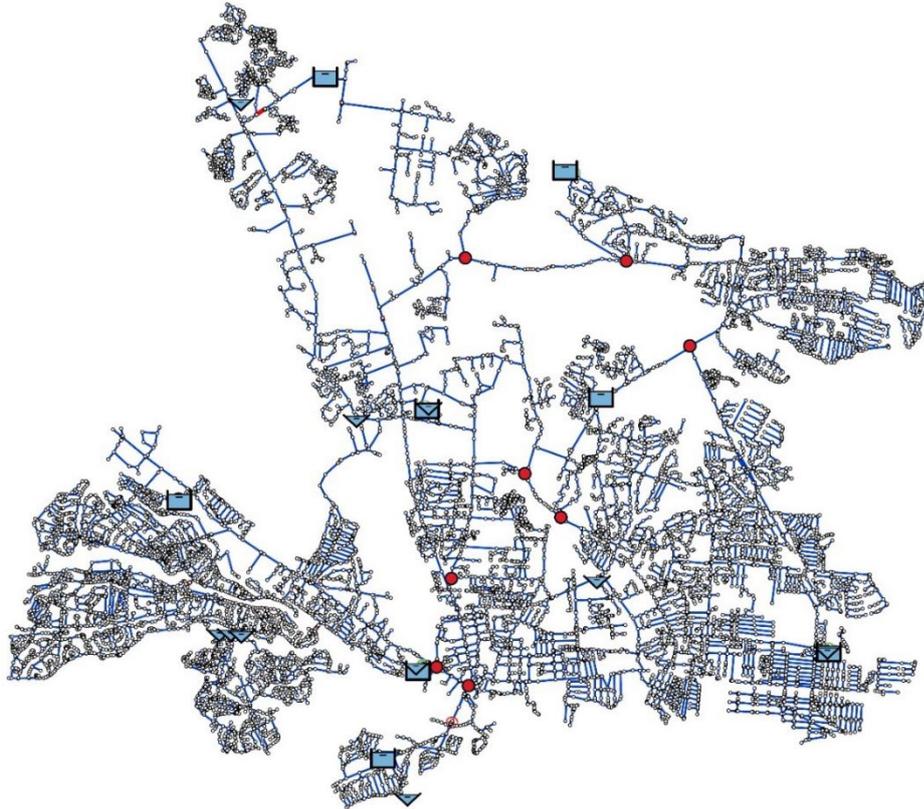


Figura 47. Elementos de control de la red NJ1.

Tabla 29 Comparativa de alturas en elementos de control para la red NJ

Elementos de Control	Altura red original (m)	Altura red Simplificada (m)	RMSE
Conexión 2624	68.01	68.01	0
Conexión 2807	68.12	68.13	0.01
Conexión 3134	67.44	67.45	0.01
Conexión 4937	66.86	66.87	0.01
Conexión 5132	63.25	63.3	0.05
Conexión 6006	66.83	66.83	0
Conexión 8709	63.63	63.67	0.04
Conexión 8743	58.37	58.48	0.11
Conexión 16568	67.65	67.65	0

En la Figura 48. se puede observar la evolución de la altura del nudo con un mayor error a lo largo de 4 horas de simulación, podemos apreciar cómo, aun siendo el nudo con el mayor error, el resultado apenas difiere de la simulación original.

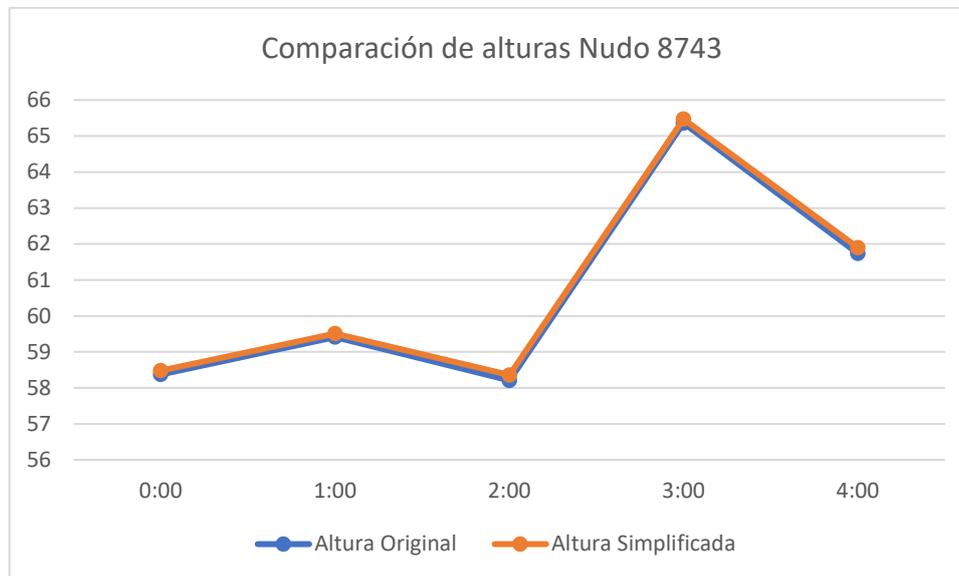


Figura 48. Evolución de alturas del nudo tras proceso de simplificación.

Tabla 30 Comparativa de caudales en elementos de control para la red NJ.

Elementos de Control	Caudal red original (l/s)	Caudal red Simplificada (l/s)	RMSE
Tubería 731	20.81	20.84	0.03
Tubería 1022	55.35	55.25	0.1
Tubería 1541	9.49	9.57	0.08
Tubería 2117	-4.26	-4.52	0.26
Tubería 2917	-52.24	-52.62	0.38
Tubería 3229	76.04	76.88	0.84
Tubería 3340	-23.04	-22.83	0.21
Tubería 3514	45	44.84	0.16
Tubería 3856	56.22	55.87	0.35
Tubería 5538	-1.02	-0.99	0.03
Tubería 5587	5.5	5.53	0.03
Tubería 5795	-60.02	-59.98	0.04
Tubería 6477	-42.2	-41.94	0.26
Tubería 6505	38.23	38.53	0.3
Tubería 6542	-95.15	-95.37	0.22
Tubería 11687	0	0	0
Tubería 17279	0	0	0
Tubería 17308	98.72	98.11	0.61
Tubería 17487	80.43	78.22	2.21
Tubería 111113	0	0	0

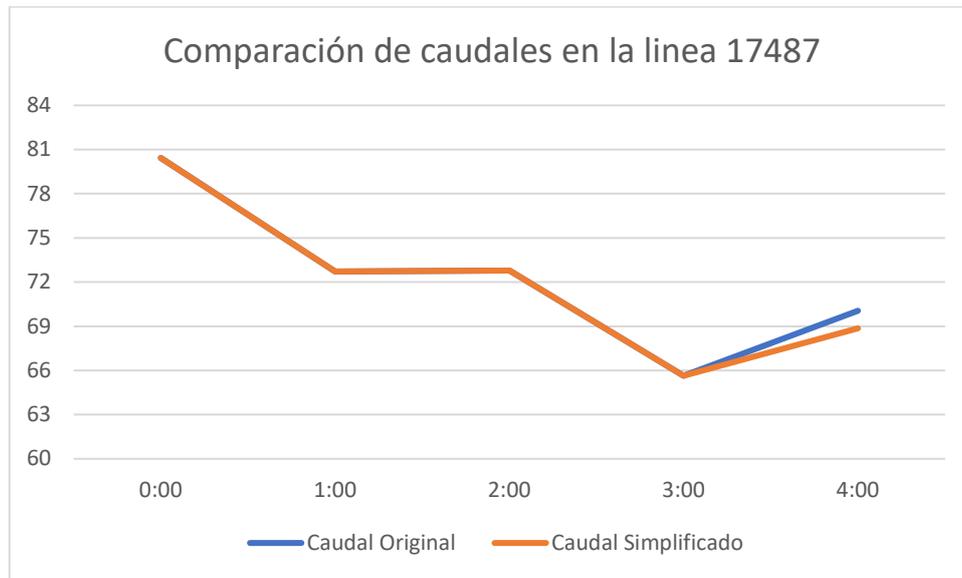


Figura 49. Comparación de caudales en la línea 17487 tras la simplificación.

Con relación a los caudales que fluyen a través de las tuberías, se puede observar que se logra el mismo volumen de flujo utilizando el cálculo de los valores equivalentes. Se evidencia que, tanto en las alturas como en los caudales de los elementos de control, se ha conseguido mantener una diferencia mínima. Esto demuestra que se ha logrado cumplir con éxito el objetivo de mantener una representación hidráulica precisa y coherente del sistema.

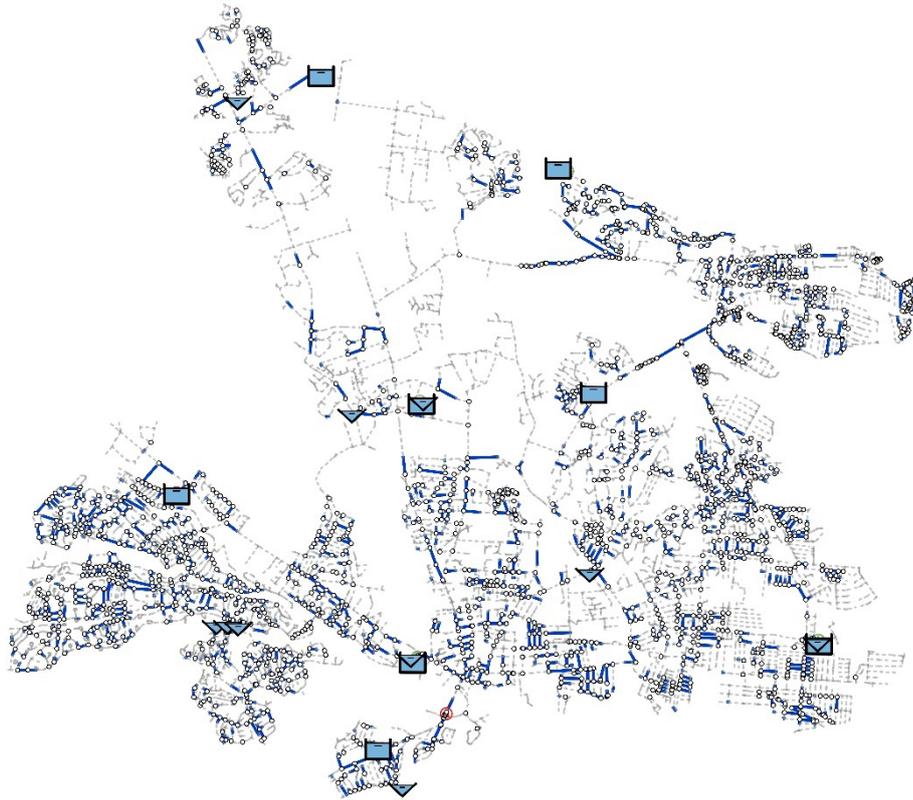


Figura 50. Elementos de la red NJ1 original que se mantienen tras la simplificación

En la Figura 50 se puede apreciar la topología de la red simplificada, luego de eliminar más de un 80% de sus elementos, las zonas desconectadas que se observan son resultado de la sustitución de tuberías paralelas o de la simplificación de tuberías en serie, ya que esta imagen solo representa los elementos originales de la red que se han conservado.

5. CONCLUSIONES

Desde este trabajo de investigación, emergen conclusiones notables que resaltan su significativa contribución al ámbito de la simplificación de Redes de Distribución de Agua (RDA):

1. Diversidad de algoritmos especializados. Se han diseñado algoritmos de simplificación, cada uno enfocado en aspectos particulares de las RDA, como tuberías paralelas, nudos intermedios y cercano o bloques terminales. Esto representa un salto cualitativo en la simplificación de RDA, ya que estos algoritmos se integran en una estructura general que permite su aplicación de manera individual o combinada. Esta flexibilidad se traduce en un potencial significativo para optimizar y adaptar modelos de RDA según las necesidades específicas de los usuarios.
2. Automatización y perfeccionamiento de algoritmos preexistentes. Se ha automatizado y mejorado algoritmos previamente desarrollados, incluyendo aquellos relacionados con bloques de múltiples entradas y salidas. Esta mejora demuestra un firme compromiso con la innovación constante en el campo de la simplificación de RDA, lo que se traduce en una simplificación más eficiente y precisa de las redes la cual se vio beneficiada por algoritmos de optimización empleadas en el presente trabajo como el de Hooke & Jeeves.
3. Amplio abanico de casos de estudio. La metodología se ha aplicado exhaustivamente en diversos casos de estudio, demostrando la efectividad de los algoritmos propuestos en términos de simplificación y preservación de características hidráulicas. Estos resultados sólidos validan la utilidad práctica de esta investigación y su aplicabilidad en una variedad de contextos de redes de distribución de agua.
4. Sensibilidad detallada a los parámetros. La realización de un análisis de sensibilidad por cada elemento, considerando factores como la variación de la rugosidad, la variación de la demanda base y el diámetro de las tuberías, refleja un enfoque analítico completo y una comprensión profunda de cómo diferentes parámetros pueden influir en la simplificación de la red. Este análisis fortalece la robustez de la metodología desarrollada.
5. Validación comparativa sólida. La comparación sistemática de los resultados entre los modelos simplificados y los modelos originales valida la eficacia de los algoritmos concebidos en este estudio. La capacidad de mantener la precisión hidráulica mientras se

logra una simplificación significativa es una contribución esencial para la gestión eficaz de las RDA y un logro destacable de esta investigación.

En síntesis, este trabajo constituye una contribución altamente relevante para el campo de la simplificación de redes de distribución de agua. Los algoritmos desarrollados, al ser versátiles y efectivos, brindan a los profesionales y gestores de redes una herramienta esencial para simplificar modelos matemáticos de RDA, lo que se traduce en una mayor eficiencia y sostenibilidad en la gestión de los sistemas de abastecimiento de agua. Esta investigación representa un paso adelante en la optimización y adaptabilidad de las redes de distribución de agua, lo que resulta fundamental para enfrentar los desafíos actuales y futuros en la gestión del recurso hídrico.

6. DESARROLLOS FUTUROS

Dentro de la metodología propuesta, se contempla la expansión de su aplicabilidad mediante la inclusión de dos aspectos cruciales en el análisis de redes de distribución de agua: el comportamiento de consumos dependientes de la presión y la calidad del agua. Para lograr una comprensión más completa y precisa del sistema, se sugiere implementar los siguientes pasos adicionales:

1. Análisis de consumos dependientes de la presión:

En redes de distribución de agua, algunos consumos están influenciados por la presión en los nodos. Para abordar esta característica, se pueden incluir emisores en los modelos matemáticos para representar estos consumos. Estos emisores pueden ser tratados como elementos de la red y ser considerados en las operaciones de simplificación. Su inclusión requerirá ajustes en los cálculos y en los parámetros equivalentes utilizados en cada algoritmo de simplificación.

2. Análisis de calidad del agua:

La calidad del agua es un aspecto crítico en las redes de distribución. Para extender la metodología al análisis de calidad del agua, será necesario considerar parámetros relacionados con la calidad, como la concentración de sustancias químicas o la temperatura. Estos parámetros también deben ser tratados como criterios en el proceso de simplificación, lo que implicará ajustes y cálculos adicionales en cada etapa del algoritmo.

3. Curvas de consigna para la calidad del agua:

Similar a las curvas de consigna de presión, se pueden introducir curvas de consigna para la calidad del agua. Estas curvas definirían los niveles de calidad mínimos requeridos en diferentes puntos de la red. Durante el proceso de simplificación, se debería garantizar que los valores de calidad se mantengan dentro de los límites establecidos por estas curvas.

Es importante destacar que la incorporación de consumos dependientes de la presión y la calidad del agua a la metodología requerirá una adaptación cuidadosa de los algoritmos y parámetros utilizados. La integración de estos aspectos en la metodología enriquecerá aún más su capacidad para representar de manera precisa y completa el comportamiento de las redes de distribución de agua en diversas situaciones y condiciones.

7. INDICIOS DE CALIDAD

Los resultados de este trabajo, con el título *Simplificación de redes de distribución de agua: una aproximación desde la teoría de grafos* se ha remitido y presentado en el congreso SEREA 2023 celebrado en la ciudad de Córdoba, España en el mes de julio del año 2023.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera, M. (2021). DESARROLLO DE ALGORITMOS DE SIMPLIFICACIÓN DE MODELOS DE REDES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA BASADOS EN LA TEORÍA DE GRAFOS Y EL USO DEL SOFTWARE EPANET 2.2.
- Bahadur, R., Johnson, J., Janke, R., & Samuels, W. B. (2008). Impact of Model Skeletonization on Water Distribution Model Parameters as Related to Water Quality and Contaminant Consequence Assessment. *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*, 1-10. [https://doi.org/10.1061/40941\(247\)64](https://doi.org/10.1061/40941(247)64)
- Baños, R., Gil, C., Reza, J., & Martínez, J. (2009). Implementation of scatter search for multi-objective optimization: A comparative study. *Computational Optimization and Applications*, 42(3), 421-441. <https://doi.org/10.1007/s10589-007-9121-1>
- Bello, O., Abu-Mahfouz, A., Hamam, Y., Page, P., Adedeji, K., & Piller, O. (2019). Solving Management Problems in Water Distribution Networks: A Survey of Approaches and Mathematical Models. *Water*, 11(3), 562. <https://doi.org/10.3390/w11030562>
- Bentley. (2022, junio 8). OpenFlows WaterGEMS. <https://www.bentley.com/software/openflows-watergems/>
- Cabrera, J. (2012). *Calibración de Modelos Hidrológicos*.
- Chapra, S. C., Canale, R. P., & Del Valle Sotelo, J. C. (2008). *Métodos numéricos para ingenieros* (5a ed). McGraw-Hill.
- Chaudhry, N. A., Saeed, M., Ali, J., Department of Mathematics, University of Management and Technology, Lahore, 54000, Pakistan, Tabassum, M. F., Luqman, M., & Department of

- Mathematics, University of Management and Technology, Lahore, 54000, Pakistan.
- (2018). Adaptive Hooke-Jeeves-evolutionary algorithm for linear equality constrained problems. *International Journal of ADVANCED AND APPLIED SCIENCES*, 5(8), 122-130. <https://doi.org/10.21833/ijaas.2018.08.015>
- Eggenger, C. L., & Polkowski, L. B. (1976). Network Models and the Impact of Modeling Assumptions. *Journal - American Water Works Association*, 68(4), 189-196. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1976.tb02385.x>
- Erniyati, & Citra, P. (2019). The implementation of the Kruskal algorithm for the search for the shortest path to the location of a building store in the city of Bogor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 621(1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/621/1/012010>
- Everitt, T., & Hutter, M. (2015). Analytical Results on the BFS vs. DFS Algorithm Selection Problem. Part I: Tree Search. En B. Pfahringer & J. Renz (Eds.), *AI 2015: Advances in Artificial Intelligence* (Vol. 9457, pp. 157-165). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26350-2_14
- Farias, N. F. D. S., Ribeiro, J. M. A., Bezerra, A. D. A., & Araújo, R. S. D. A. (2021). FARIAS DIMENSIONAMENTO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA UTILIZANDO TEORIA DOS GRAFOS. *Brazilian Journal of Development*, 7(5). <https://doi.org/10.34117/bjdv7n5-589>
- Giustolisi, O., Savic, D. A., & Kapelan, Z. (2011). Analysis of Simplification Errors for Water Distribution Models. *Water Distribution Systems Analysis 2010*, 1400-1412. [https://doi.org/10.1061/41203\(425\)125](https://doi.org/10.1061/41203(425)125)

- Godsil, C., & Royle, G. (2001). Algebraic Graph Theory (Vol. 207). Springer New York.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0163-9>
- Gupta, H. V., & Kling, H. (2011). On typical range, sensitivity, and normalization of Mean Squared Error and Nash-Sutcliffe Efficiency type metrics. *Water Resources Research*, 47(10). <https://doi.org/10.1029/2011WR010962>
- Hajibabaei, M., Hesarkazzazi, S., Dastgir, A., Minaei, A., & Sitzenfrei, R. (2023). Reconstruction of Missing Information in Water Distribution Networks Based on Graph Theory (p. 1026). <https://doi.org/10.1061/9780784484852.093>
- Hamberg, D., & Shamir, U. (1988). Schematic Models for Distribution Systems Design. I: Combination Concept. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 114(2), 129-140. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1988\)114:2\(129\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1988)114:2(129))
- Hirrel, T. D. (2010). Lossless network skeletonization. *Journal - American Water Works Association*, 102(9), 90-95. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2010.tb10190.x>
- Hoagland, S., Schal, S., Ormsbee, L., & Bryson, S. (2015). Classification of Water Distribution Systems for Research Applications. *World Environmental and Water Resources Congress 2015*, 696-702. <https://doi.org/10.1061/9780784479162.064>
- Hodson, T. O. (2022). Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): When to use them or not. *Geoscientific Model Development*, 15(14), 5481-5487. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>
- Iglesias-Rey, P. L., Martínez-Solano, F. J., & Ribelles-Aquilar, J. V. (2017). Extending EPANET Capabilities with Add-In Tools. *Procedia Engineering*, 186, 626-634. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.279>

- Jeppson, R. W. (1982). Equivalent Hydraulic Pipe for Parallel Pipes. *Journal of the Hydraulics Division*, 108(1), 35-45. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0005808>
- Jung, B., Boulos, P. F., & Wood, D. J. (2007). Impacts of Skeletonization on Distribution System Hydraulic Transient Models. *World Environmental and Water Resources Congress 2007*, 1-10. [https://doi.org/10.1061/40927\(243\)456](https://doi.org/10.1061/40927(243)456)
- Lammich, P., & Nipkow, T. (2022). Purely Functional, Simple, and Efficient Implementation of Prim and Dijkstra.
- Marchi, A., Salomons, E., Ostfeld, A., Kapelan, Z., Simpson, A. R., Zecchin, A. C., Maier, H. R., Wu, Z. Y., Elsayed, S. M., Song, Y., Walski, T., Stokes, C., Wu, W., Dandy, G. C., Alvisi, S., Creaco, E., Franchini, M., Saldarriaga, J., Páez, D., ... Asadzadeh, M. (2014). Battle of the Water Networks II. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(7), 04014009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000378](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000378)
- Martinez Alzamora, F., Ulanicki, B., & Salomons, E. (2014). Fast and Practical Method for Model Reduction of Large-Scale Water-Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(4), 444-456. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000333](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000333)
- Martínez-Solano, F. J., Iglesias-Rey, P. L., Mora-Meliá, D., & Fuertes-Miquel, V. S. (2014). Using the Set Point Concept to Allow Water Distribution System Skeletonization Preserving Water Quality Constraints. *Procedia Engineering*, 89, 213-219. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.179>
- Meijer, D., Post, J., Van Der Hoek, J. P., Korving, H., Langeveld, J., & Clemens, F. (2021). Identifying critical elements in drinking water distribution networks using graph theory.

Structure and Infrastructure Engineering, 17(3), 347-360.

<https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1751664>

Newman, M. (2018). Networks an introduction. (Vol. 1). Oxford University Press.

<https://doi.org/10.1093/oso/9780198805090.001.0001>

Nugraha, N., & Wulandari, D. (2021). Implementasi Algoritma Floyd-Warshall pada Sistem Informasi Geografis Kampus UNIKU Berbasis Android Studi Kasus: (Universitas Kuningan)). JEJARING : Jurnal Teknologi dan Manajemen Informatika, 6(2), 26-42.

<https://doi.org/10.25134/jejaring.v6i2.6741>

Ostfeld, A. (2015). Water Distribution Networks. En E. Kyriakides & M. Polycarpou (Eds.), Intelligent Monitoring, Control, and Security of Critical Infrastructure Systems (Vol. 565, pp. 101-124). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44160-2_4

Ostfeld, A., Salomons, E., Ormsbee, L., Uber, J. G., Bros, C. M., Kalungi, P., Burd, R., Zazula-Coetzee, B., Belrain, T., Kang, D., Lansey, K., Shen, H., McBean, E., Yi Wu, Z., Walski, T., Alvisi, S., Franchini, M., Johnson, J. P., Ghimire, S. R., ... McKillop, R. (2012). Battle of the Water Calibration Networks. Journal of Water Resources Planning and Management, 138(5), 523-532. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000191](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000191)

Pasha, M., Perez, L., Weathers, M., & Smith, B. (2023). Effect of Skeletonization on Energy Consumption of Water Distribution System (p. 899).

<https://doi.org/10.1061/9780784484852.083>

Raghava, Dr. M., Rambabu, B., Assoc. Professor, CVR College of Engineering/CSE Department, Hyderabad, India, Dattatreya, V., & Assoc. Professor, CVR College of Engineering/CSE Department, Hyderabad, India. (2019). Hooke and Jeeves Pattern Search Method and

- Global Optimal Solution. *CVR Journal of Science & Technology*, 17(1), 67-72.
<https://doi.org/10.32377/cvrjst1712>
- Rossman, L. A. (1999). The EPANET Programmer's Toolkit for Analysis of Water Distribution Systems. *WRPMD'99*, 1-10. [https://doi.org/10.1061/40430\(1999\)39](https://doi.org/10.1061/40430(1999)39)
- Rossman, L. A., Woo, H., Tryby, M., Shang, F., Janke, R., & Haxton, T. (2021). Manual del usuario de EPANET 2.2.
- Saldarriaga, J. G., Ochoa, S., Rodriguez, D., & Arbeláez, J. (2009). Water Distribution Network Skeletonization Using the Resilience Concept. *Water Distribution Systems Analysis 2008*, 1-13. [https://doi.org/10.1061/41024\(340\)74](https://doi.org/10.1061/41024(340)74)
- Shekofteh, M., Jalili Ghazizadeh, M., & Yazdi, J. (2020). A methodology for leak detection in water distribution networks using graph theory and artificial neural network. *Urban Water Journal*, 17(6), 525-533. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1797832>
- Shmaya, T., & Ostfeld, A. (2022). A Graph-Theory-Based PRV Placement Algorithm for Reducing Water Age in Water Distribution Systems. *Water*, 14(23), 3796. <https://doi.org/10.3390/w14233796>
- Simone, A. (2023). Vulnerability assessment of urban drainage network using relevance-based centrality metrics. *River*, 2(1), 39-51. <https://doi.org/10.1002/rvr2.30>
- US EPA, O. (2013, marzo 20). U.S. Environmental Protection Agency [Collections and Lists]. <https://www.epa.gov/home>
- Zheng, F., Simpson, A. R., Zecchin, A. C., & Deuerlein, J. W. (2013). A graph decomposition-based approach for water distribution network optimization: Decomposition Method for



Optimizing Networks. Water Resources Research, 49(4), 2093-2109.

<https://doi.org/10.1002/wrcr.20175>