

# Trabajo Fin de Máster

## *DESARROLLO DE METODOLOGÍA PARA LA SIMPLIFICACIÓN DE MODELOS DE REDES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA REALIZADOS CON EL SOFTWARE EPANET 2.2*

**Intensificación:** *HIDRÁULICA URBANA*

**Autor:**

*HERNÁN SPACCESI*

**Tutor:**

*DR. PEDRO L. IGLESIAS REY*

**Cotutor:**

*DR. F. JAVIER MARTÍNEZ SOLANO*

**SEPTIEMBRE 2020**



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihma**

Datos del proyecto
<b>Título del TFM en español:</b> Desarrollo de metodología para la simplificación de modelos de redes de abastecimiento de agua realizados con el software EPANET 2.2
<b>Título del TFM en inglés:</b> Simplification methodology development of water networks models executed with EPANET 2.2 software
<b>Título del TFM en valenciano:</b> Desenrotllament de metodologia per a la simplificació de models de xarxes d'abastiment d'aigua realitzats amb el programari EPANET 2.2
<b>Alumno:</b> HERNÁN SPACCESI
<b>Tutor:</b> PEDRO LUIS IGLESIAS REY
<b>Cotutor:</b> FRANCISCO JAVIER MARTÍNEZ SOLANO
<b>Intensificación:</b> HIDRÁULICA URBANA
<b>Fecha de defensa:</b> SEPTIEMBRE, 2020

### Resumen en castellano

En general, los modelos informáticos son construidos para representar una realidad cuya complejidad imposibilita su análisis analítico. En el caso particular de las redes de distribución de agua, constituyen una potente herramienta de obtención de información útil para la toma de decisiones relacionadas con la operación de la red y la gestión del recurso. El problema surge cuando, en la búsqueda de aumentar la fiabilidad, suelen incorporarse gran parte de los elementos constitutivos de las redes, incluso aquellos que podrían ser considerados prescindibles. Esto conlleva a la obtención de modelos de distribución muy completos que si bien cumplen la función de emular correctamente la realidad que representan, suelen tornarse demasiado complejos para ciertos tipos de análisis cuando la red posee dimensiones topológicas de gran magnitud.

Un caso particular de lo mencionado son los modelos de operación y monitoreo de redes de abastecimiento en tiempo real. Estos sistemas deben ser lo suficientemente sencillos como para poder interpretar fácilmente los fenómenos que ocurren en el sistema. Otro caso común es el análisis de sustitución de tuberías para mejorar el funcionamiento de la red, muy utilizado por las empresas abastecedoras en su búsqueda por encontrar la forma más eficiente de invertir el dinero disponible para rehabilitación. En ambos casos, el trabajo se realiza con programas informáticos que ejecutan numerosas simulaciones variando diferentes parámetros topológicos e hidráulicos que consiguen la solución óptima que cumpla los criterios de cálculo prefijados. Evidentemente, la rapidez con que se ejecuta el algoritmo está directamente relacionada con las características topológicas de la red: a mayor complejidad y tamaño, mayor es el tiempo empleado.

A partir de lo anterior, surge la necesidad de realizar simplificaciones en aquellas infraestructuras cuyas dimensiones generan tiempos de simulación tan excesivos que dificultan e incluso imposibilitan la ejecución de análisis de optimización. Esta simplificación debe realizarse utilizando estrictos criterios topológicos e hidráulicos, puesto que los resultados obtenidos en la red simplificada deben ser lo suficientemente válidos como para poder ser extrapolados a la red original.

Para resolver el problema planteado, se propone desarrollar una metodología de simplificación de modelos de redes abastecimiento de agua realizados con el software EPANET 2.2. El objetivo es definir un procedimiento que permita obtener, a partir de una red inicial compleja, otra equivalente en términos hidráulicos pero topológicamente simplificada. El método se plantea por etapas definidas en base a los criterios de simplificación adoptados, lo cual permite que sea adaptable a múltiples tipos de redes y análisis. A su vez, se crean herramientas informáticas utilizando la Toolkit específica del software que ayudan a automatizar gran parte del proceso de sintetización, algo que aumenta considerablemente la practicidad de la metodología.

**Palabras clave en castellano:** Red de abastecimiento de agua; Simplificación; EPANET; Toolkit.

### Resumen en inglés

In general, computer models are built to represent a reality whose complexity makes analytical analysis impossible. In the particular case of water distribution networks, they constitute a powerful tool for obtaining useful information for making decisions related to the operation of the network and the management of the resource. The problem arises when, in the search to increase reliability, a large part of the constituent elements of the networks are usually incorporated, even those that could be considered expendable. This leads to obtaining very complete distribution models that, although they fulfill the function of correctly emulating the reality they represent, tend to become too complex for certain types of analysis when the network has large topological dimensions.

A particular case of the aforementioned are the models of operation and monitoring of supply networks in real time. These systems must be simple enough to be able to easily interpret the phenomena that occur in the system. Another common case is the analysis of pipe substitution to improve the operation of the network, widely used by supply companies in their search to find the most efficient way to invest the money available for rehabilitation. In both cases, the work is carried out with computer programs that run numerous simulations varying different topological and hydraulic parameters to achieve the optimal solution that meets the predetermined calculation criteria. Obviously, the speed with which the algorithm is executed is directly related to the topological characteristics of the network: the greater the complexity and size, the greater the time taken.

From the above, the need arises to carry out simplifications in those infrastructures whose dimensions generate simulation times so excessive that they make it difficult or even impossible to execute optimization analyzes. This simplification must be done using strict topological and hydraulic criteria, since the results obtained in the simplified network must be valid enough to be extrapolated to the original network.

To solve the problem, it is proposed to develop a methodology to simplify models of water supply networks made with the EPANET 2.2 software. The objective is to define a procedure that allows obtaining, from a complex initial network, another equivalent in hydraulic terms but topologically simplified. The method is proposed in stages defined based on the simplification criteria adopted, which allows it to be adaptable to multiple types of networks and analyzes. Additionally, computer tools are created using the software-specific Toolkit that help automate a large part of the synthesis process, something that considerably increases the practicality of the methodology.

**Palabras clave en inglés:** Water supply network; Skeletonization; EPANET; Toolkit.

### Resumen en valenciano

En general, els models informàtics són construïts per a representar una realitat la complexitat de la qual impossibilita la seua anàlisi analítica. En el cas particular de les xarxes de distribució d'aigua, constitueixen una potent ferramenta d'obtenció d'informació útil per a la presa de decisions relacionades amb l'operació de la xarxa i la gestió del recurs. El problema sorgix quan, en la busca d'augmentar la fiabilitat, solen incorporar-se gran part dels elements constitutius de les xarxes, inclús aquells que podrien ser considerats prescindibles. Açò comporta a l'obtenció de models de distribució molt complets que si bé complixen la funció d'emular correctament la realitat que representen, solen tornar-se massa complexos per a certs tipus d'anàlisi quan la xarxa posseïx dimensions topològiques de gran magnitud.

Un cas particular d'allò que s'ha mencionat són els models d'operació i monitoreo de xarxes d'abastiment en temps real. Estos sistemes han de ser prou senzills com per a poder interpretar fàcilment els fenòmens que ocorren en el sistema. Un altre cas comuna és l'anàlisi de substitució de canonades per a millorar el funcionament de la xarxa, molt utilitzat per les empreses abastidores en la seua busca per trobar la forma més eficient d'invertir els diners disponibles per a rehabilitació. En ambdós casos, el treball es realitza amb programes informàtics que executen nombroses simulacions variant diferents paràmetres topològics i hidràulics que aconseguir la solució òptima que complisca els criteris de càlcul prefixats. Evidentment, la rapidesa amb què s'executa l'algoritme està directament relacionada amb les característiques topològiques de la xarxa: a major complexitat i grandària, major és el temps empleat.

A partir de l'anterior, sorgix la necessitat de realitzar simplificacions en aquelles infraestructures les dimensions de les quals generen temps de simulació tan excessius que dificulten i inclús impossibiliten l'execució d'anàlisi d'optimització. Esta simplificació ha de realitzar-se utilitzant estrictes criteris topològics i hidràulics, ja que els resultats obtinguts en la xarxa simplificada han de ser prou vàlids com per a poder ser extrapolats a la xarxa original.

Per a resoldre el problema plantejat, es proposa desenrotllar una metodologia de simplificació de models de xarxes abastiment d'aigua realitzats amb el programari EPANET 2.2. L'objectiu és definir un procediment que permeta obtindre, a partir d'una xarxa inicial complexa, una altra equivalent en termes hidràulics però topològicament simplificada. El mètode es planteja per etapes definides basant-se en els criteris de simplificació adoptats, la qual cosa permet que siga adaptable a múltiples tipus de xarxes i anàlisi. Al seu torn, es creguen ferramentes informàtiques utilitzant la Toolkit específica del programari que ajuden a automatitzar gran part del procés de sintetització, quelcom que augmenta considerablement la practicidad de la metodologia.

**Palabras clave en valenciano:** Xarxa d'abastiment d'aigua; Simplificació; EPANET; Toolkit.

## Índice de contenido

1. INTRODUCCIÓN .....	7
1.1 Introducción.....	7
1.2 Objetivos del trabajo .....	9
1.2.1 Objetivo general.....	9
1.2.2 Objetivos específicos .....	9
1.3 Estructura del documento .....	10
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	11
2.1 Herramientas para modelación computacional .....	11
2.1.1 Modelos matemáticos de redes de distribución de agua potable.....	11
2.1.2 El software EPANET .....	14
2.1.3 La Toolkit de EPANET.....	16
2.1.4 El lenguaje Visual Basic .NET.....	19
2.2 Estado del arte de la simplificación de modelos de redes de distribución de agua .....	20
2.2.1 La necesidad de simplificar .....	20
2.2.2 Metodologías de simplificación.....	22
2.2.3 Efectos de la simplificación.....	32
2.2.4 Campo de estudio.....	34
2.2.5 Indicadores de eficiencia de modelos .....	35
3. METODOLOGÍA PARA LA SIMPLIFICACIÓN DE MODELOS DE RDA REALIZADOS CON EPANET .....	39
3.1 Introducción.....	39
3.2 Descripción de la metodología propuesta.....	39
3.2.1 Datos de partida.....	39
3.2.2 Algoritmo de simplificación .....	40
3.2.3 Algoritmo de validación de la simplificación.....	47
3.2.4 Parámetros de simplificación y validación.....	55
3.3 Descripción de las operaciones de simplificación.....	62
3.3.1 Unión de tuberías paralelas .....	62
3.3.2 Simplificación de nudos terminales.....	68
3.3.3 Simplificación de nudos intermedios .....	71
3.3.4 Simplificación de bloques terminales.....	79
3.3.5 Simplificación por unión de nudos cercanos .....	81
3.4 Diagrama completo de la metodología propuesta. ....	83

4. HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA LA APLICACIÓN AUTOMATIZADA DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA .....	85
4.1 Objetivo y características de la herramienta .....	85
4.2 Interfaz de la herramienta .....	85
4.2.1 Datos de partida .....	85
4.2.2 Simplificación .....	86
4.2.3 Resultados.....	87
5. CASO DE ESTUDIO .....	89
5.1 Presentación del caso de estudio.....	89
5.2 Descripción del proceso realizado .....	91
5.3 Análisis de sensibilidad para definición de parámetros de simplificación .....	91
5.3.1 Variación de diferencias de rugosidad máximas admisibles.....	91
5.3.2 Variación de diferencias de diámetro máximas admisibles.....	92
5.3.3 Variación de demanda base máxima admisible.....	94
5.3.4 Variación de cantidad de nudos y líneas de control.....	95
5.3.5 Variación de diferencia de caudal y presión máxima admisible .....	96
5.3.6 Variación del valor mínimo admisible del índice de Nash-Suttcliffe .....	97
5.4 Definición de parámetros de simplificación para el caso de estudio.....	99
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	101
6.1 Topología de la red simplificada .....	101
6.2 Precisión hidráulica de la simplificación.....	106
6.2.1 Demanda base.....	106
6.2.2 Alturas piezométricas .....	106
6.2.3 Caudales.....	109
6.3 Curva de consigna .....	112
7. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS .....	113
7.1 Conclusiones .....	113
7.2 Desarrollos futuros.....	115
7.3 Indicios de calidad.....	116
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117

## Índice de tablas

Tabla 1 - Cronología de métodos de análisis de RDA por periodos (Ramalingam et al., 2003) .....	11
Tabla 2 - Funciones de la Toolkit de EPANET (Vegas Niño et al., 2017).....	17
Tabla 3 – Funciones de la Toolkit EPANET 2.2 2019 .....	18
Tabla 4 - Interpretación de valores de NS (Molnar, 2011).....	36
Tabla 5 - interpretación del índice de desempeño (Camargo & Sentelhas, 1997).....	38
Tabla 6 - Pasos de metodología de simplificación propuesta. ....	54
Tabla 7 - Ejemplo de diferencia porcentual entre diámetros (mm). ....	57
Tabla 8 - Ejemplo de diferencia porcentual entre rugosidades (H-W 1905).....	58
Tabla 9 – Análisis de influencia del coeficiente de rugosidad $\varepsilon$ en el factor de fricción $f$ .....	59
Tabla 10 - Parámetros a definir por el usuario de la metodología. ....	61
Tabla 11 – Características topológicas e hidráulicas de la red de estudio BWSN - 2.....	90
Tabla 12 - Análisis de la influencia del $\Delta$ Rug admisible. ....	92
Tabla 13 - Análisis de la influencia del $\Delta\emptyset$ admisible. ....	93
Tabla 14 - Análisis de la influencia de la $Dem_{max}$ admisible. ....	94
Tabla 15 - Análisis de la influencia de la cantidad de elementos de control. ....	95
Tabla 16 - Análisis de la influencia del $\Delta$ Q y $\Delta$ P admisible. ....	96
Tabla 17 - Análisis de la influencia del valor mínimo admisible del índice NS. ....	97
Tabla 18 – Casos de valores extremos de parámetros. ....	99
Tabla 19 - Parámetros de simplificación definidos para el caso de estudio. ....	99
Tabla 20 - Comparación de características topológicas de la RDA original y simplificada.....	102
Tabla 21 - Resumen de la reducción de red por etapas de simplificación.....	105
Tabla 22 - Comparación de características hidráulicas de la RDA original y simplificada.....	106
Tabla 23 - Análisis de variación de alturas piezométricas en los nudos de control.....	107
Tabla 24 - Diferencias absolutas de alturas piezométricas de los nudos de la red simplificada.....	108
Tabla 25 - Diferencias relativas de alturas piezométricas de los nudos de la red simplificada.....	109
Tabla 26 - Análisis de variación de caudales en las líneas de control.....	109
Tabla 27 - Diferencias absolutas de caudal de todas las líneas de la red simplificada. ....	110
Tabla 28 - Diferencias relativas de caudales de todos las líneas de la red simplificada. ....	112

## Índice de figuras

Figura 1 – Esquema conceptual de RDA (Ulanicki et al., 1998) .....	13
Figura 2 - Esquema de componentes de un modelo de RDA (Ulanicki et al., 1998) .....	13
Figura 3 - Interfaz de desarrollo de código Visual Studio.....	19
Figura 4 - Representación comparativa entre GIS y modelo de RDA (Jung et al., 2007) .....	21
Figura 5 - Simplificación de ramales terminales.....	23
Figura 6 - Simplificación de nudos intermedios .....	23
Figura 7 - Unión de tuberías paralelas .....	23
Figura 8 - Eliminación de tuberías para apertura de mallas.....	24
Figura 9 - Esquema de control planteado (Paluszczyszyn et al., 2011).....	27
Figura 10 - Interfaz de Simplifier2 (Paluszczyszyn et al., 2015) .....	28
Figura 11 - Sector original (izq.) y sector simplificado (der.)(Duzinkiewicz & Ciminski, 2006) .....	28
Figura 12 – Esquema de simplificación de RDA usando teoría de grafos (Deuerlein, 2008). .....	29
Figura 13 - Ejemplo de división de RDA en clústeres (Perelman & Ostfeld, 2011).....	30
Figura 14 Izq.: Red modelo para la esqueletización (Ilaya-Ayza et al., 2017) .....	31
Figura 15 - Diagrama de flujo general del método propuesto .....	41
Figura 16 – Técnicas de simplificación de la Etapa nº1 .....	41
Figura 17 - Ejemplo de influencia de orden de simplificación.....	42
Figura 18 - Ejemplo de influencia de orden de simplificación.....	42
Figura 19 - Ejemplo de influencia de orden de simplificación.....	42
Figura 20 - Ejemplo de simplificación con algoritmo iterativo .....	43
Figura 21 - Algoritmo de simplificación de la Etapa nº1 .....	43
Figura 22 - Algoritmo de simplificación de etapa nº1 con subprocesos. ....	44
Figura 23 - Ejemplo de bloque terminal.....	45
Figura 24 - Diagrama de flujo Etapa nº2 parcial. ....	45
Figura 25 - Ejemplo de simplificación por unión de nudos cercanos. ....	46
Figura 26 - Diagrama de flujo del algoritmo de simplificación.....	47
Figura 27 - Esquema del sistema de validación propuesto.....	48
Figura 28 - Ejemplo de curva de evolución de presión de un nudo en red original y red simplificada. ....	49
Figura 29 - Elementos de control para un nivel de ajuste general del modelo reducido. ....	49
Figura 30 - Elementos de control para un nivel de ajuste sectorizado del modelo reducido.....	50
Figura 31 – Diagrama de flujo de algoritmo de validación de la simplificación. ....	52
Figura 32 - Diagrama de flujo de algoritmo de simplificación y validación.....	53

Figura 33 - En verde, posible nudo intermedio candidato.....	57
Figura 34 - En verde, posible nudo intermedio candidato.....	58
Figura 35 - En verde, posibles candidatos a unión por nudos cercanos. ....	60
Figura 36 - En verde, posibles candidatos a unión por nudos cercanos. ....	60
Figura 37 - Ejemplo de unión de tuberías paralelas. ....	62
Figura 38 - Unión de tuberías con ecuación Hazen – Williams (1905). ....	63
Figura 39 - Unión de tuberías con ecuación Darcy - Weisbach (1845). ....	65
Figura 40 – Ejemplo de simplificación de nudo terminal.....	68
Figura 41 - Ejemplos de secuencia de simplificación para cálculo de curva consigna.....	70
Figura 42 - Ejemplo de simplificación de nudo intermedio.....	71
Figura 43 - Unión de tuberías en serie con ecuación de Hazen - Williams (1905). ....	73
Figura 44 - Simplificación de nudo intermedio con flujo hacia la derecha. ....	75
Figura 45 - Simplificación de nudo intermedio con flujo hacia el mismo nudo. ....	78
Figura 46 - Ejemplo de simplificación de bloque terminal.....	79
Figura 47 - Ejemplo de simplificación por unión de nudos cercanos. ....	81
Figura 48 - Diagrama completo de metodología de simplificación propuesta. ....	84
Figura 49 - Módulo I de la herramienta informática de simplificación.....	86
Figura 50 - Módulo II de la herramienta informática de simplificación.....	87
Figura 51 - Módulo III de la herramienta informática de simplificación.....	88
Figura 52 - Red BWSN-2 utilizada como caso de estudio.....	89
Figura 53 - Mapa de contorno de cotas de nudo. ....	90
Figura 54 - Relación entre el $\Delta R_{ug}$ admisible y el % de nudos resultante respecto a la red original. ...	92
Figura 55 - Relación entre el $\Delta R_{ug}$ admisible y el % de líneas resultante respecto a la red original. ....	92
Figura 56 - Relación entre el $\Delta \emptyset$ admisible y el % de nudos resultante respecto a la red original.....	93
Figura 57 - Relación entre el $\Delta \emptyset$ admisible y el % de líneas resultante respecto a la red original. ....	93
Figura 58 - Relación entre la $Dem_{max}$ admisible y el % de nudos resultante respecto a la red original.	94
Figura 59 - Relación entre la $Dem_{max}$ admisible y el % de líneas resultante respecto a la red original.	94
Figura 60 - Relación entre el n° de elementos de control y el % de nudos resultante. ....	95
Figura 61 - Relación entre el n° de elementos de control y el % de líneas resultante.....	96
Figura 62 - Relación entre el $\Delta Q$ y $\Delta P$ admisible y el % de nudos resultante.....	97
Figura 63 - Relación entre el $\Delta Q$ y $\Delta P$ admisible y el % de líneas resultante. ....	97
Figura 64 - Relación entre el NS mínimo admisible y el % de nudos resultante. ....	98
Figura 65 - Relación entre el NS mínimo admisible y el % de nudos resultante. ....	98

Figura 66 - Localización de elementos de control en la red de estudio BWSN-2.....	100
Figura 67 - Red BWSN-2 simplificada con método propuesto. ....	101
Figura 68 - Red BWSN-2 original (izquierda) y simplificada (derecha). ....	102
Figura 69 - Distinción de diámetros de tuberías en red original y simplificada. ....	103
Figura 70 - Red original. ....	103
Figura 71 - Red con tuberías paralelas simplificadas. ....	104
Figura 72 - Red con nudos terminales simplificados. ....	104
Figura 73 - Red con nudos intermedios simplificados. ....	104
Figura 74 - Red con bloques terminales simplificados.....	105
Figura 75 - Red con nudos cercanos simplificados. ....	105
Figura 76 - Distribución de nudos según $\Delta H_i$ (mca). ....	108
Figura 77 - Distribución de líneas según $\Delta Q_i$ (lps). ....	111
Figura 78 - Ejemplo de curva de altura de consigna en software EPANET .....	112

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Introducción

El desarrollo de las civilizaciones ha estado desde siempre vinculado a la disponibilidad de agua. Antiguamente, los pueblos se asentaban a orillas de ríos y lagos que servían de fuente de suministro de este preciado recurso vital. Con el pasar de los años, el ser humano aprendió a construir canales de abastecimiento por gravedad y más tarde tuberías a presión, que conducían el agua hasta los sitios de consumo. Estos avances marcarían un hito en la historia al permitir que instalarse en la ribera de una fuente ya no fuera un requisito indispensable para sobrevivir. Desde entonces, el conocimiento de la hidráulica y la evolución de la tecnología aplicada han aumentado de manera exponencial hasta llegar a la actualidad en la que somos capaces, entre muchas otras cosas, de construir ciudades enteras que se desarrollan en las más extremas condiciones hídricas.

La breve reseña histórica anterior tiene como objetivo destacar la importancia que ha tenido y tendrá el agua en toda forma de vida. Es por ello que el estudio de su origen, captación, tratamiento, distribución y depuración es una materia fundamental para el progreso y la subsistencia de las especies del planeta. Sin agua no hay vida posible y, si bien se han realizado importantes avances, aún falta mucho camino por recorrer.

Desde hace ya varias décadas, las redes de distribución son estudiadas mediante modelos matemáticos. Estos sistemas están formados por distintos elementos, tales como tanques y tuberías, a través de los cuales el agua fluye de diversas maneras. La forma en que esto ocurre es descrita por ecuaciones que explican el comportamiento de fluidos a presión. Debido a su complejidad, la resolución de estas expresiones matemáticas es en general realizada por ordenadores.

Anteriormente las computadoras poseían muy baja capacidad de procesamiento y, por lo tanto, resultaba necesario reducir las redes de distribución de agua (RDA) para modelarlas. Hoy en día los ordenadores pueden trabajar con grandes volúmenes de datos sin inconvenientes. Además, existen sistemas de información altamente desarrollados que permiten confeccionar modelos matemáticos con gran nivel de detalle. Las RDA elaboradas a partir de información GIS (en inglés: Geographic Information System) son un ejemplo de ello.

Más allá de lo anterior, para ciertas tareas sigue siendo preferible contar con un modelo reducido que admita una interpretación más sencilla de los fenómenos hidráulicos. Esta necesidad de contar con redes simples surge a partir de la búsqueda de eficiencia en el trabajo. La cantidad de recursos que requiere la construcción, calibración y utilización de un modelo complejo es muy superior a la exigida por un modelo sencillo y, sin embargo, mayor complejidad no implica siempre mayor precisión. Es debido a este concepto que la necesidad de esqueletizar las redes se encuentra aún muy vigente. Uno de los ejemplos de aplicación principal de esta idea son los modelos de operación y monitoreo en tiempo real. Evidentemente, estos sistemas deben ser lo suficientemente sencillos como para poder interpretar fácilmente los fenómenos que ocurren en el sistema y, a la vez, ser un reflejo fehaciente de la hidráulica del mismo. Otro caso en el cual se precisan modelos simplificados son los utilizados como base para algoritmos de optimización. Reducir el tamaño del espacio de soluciones incrementa en gran magnitud la eficiencia del trabajo, puesto que reduce tanto el tiempo de cálculo como los recursos informáticos afectados. Continuando con los ejemplos de aplicación, los modelos estratégicos son también un caso interesante de necesidad de esqueletización, puesto que al estar orientados a

análisis globales de la red, el excesivo nivel de detalle de la misma se convierte en una interferencia para el estudio.

Con el fin de realizar un pequeño aporte a esta apasionante rama de la ciencia y la ingeniería, el presente trabajo se orienta al desarrollo de una metodología de simplificación que permita de forma práctica y eficiente, contar con modelos reducidos aptos para ejecutar las tareas mencionadas anteriormente. Considerando que para que una RDA simplificada sea realmente útil esta debe contemplar de alguna forma la información de la porción de la red que ha sido eliminada, la metodología desarrollada incluye la relocalización de las demandas y el cálculo de las curvas de alturas piezométricas de consigna para cada nudo simplificado. Esto le brinda al usuario la posibilidad de operar con la red reducida teniendo bajo control las necesidades hidráulicas de la red original completa.

## 1.2 Objetivos del trabajo

### 1.2.1 Objetivo general

- Desarrollar una metodología de simplificación práctica, versátil y fiable de modelos de redes de distribución de agua realizados con el programa informático EPANET.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar el estudio del estado del arte de metodologías de simplificación de modelos de redes de distribución de agua (RDA).
- Comprender el funcionamiento global de los modelos de RDA, identificando sus componentes principales y secundarios.
- Generar un criterio propio de simplificación de modelos de RDA.
- Brindar información para garantizar el cumplimiento de las presiones mínimas de servicio en los nudos simplificados, a través del cálculo de curvas de consigna.
- Automatizar las tareas de simplificación mediante el desarrollo de herramientas informáticas.
- Efectuar un análisis de sensibilidad para valorar la influencia de cada uno de los parámetros intervinientes en la simplificación.
- Aplicar la metodología desarrollada a un caso de estudio concreto, con el fin de evaluar fortalezas y debilidades del procedimiento propuesto.

### 1.3 Estructura del documento

El presente trabajo se estructura en capítulos cuyo contenido se describe brevemente a continuación.

El Capítulo 1 contiene una introducción sobre el estudio realizado y los objetivos perseguidos, tanto generales como específicos.

En el Capítulo 2 se recogen los fundamentos teóricos que sustentan científicamente al estudio desarrollado. En primer lugar se comenta sobre los modelos matemáticos de RDA y sus aplicaciones en informática y, en segundo término, se hace un análisis exhaustivo del estado del arte en lo referente a metodologías de simplificación de RDA.

En el Capítulo 3 se describe la metodología propuesta objeto del presente trabajo. Son detalladas las premisas adoptadas y el procedimiento elaborado por el autor.

En el Capítulo 4 se exponen las herramientas informáticas desarrolladas para la ejecución automática de ciertos procesos de simplificación.

En el Capítulo 5 se analiza un caso de estudio concreto de RDA, al cual se le aplica la metodología diseñada hasta obtener la versión reducida del modelo.

En el Capítulo 6 se ejecuta un análisis de los resultados obtenidos en el caso de estudio, presentando resultados y evaluando la eficiencia del método propuesto.

En el Capítulo 7 se presentan las conclusiones generales del trabajo y los desarrollos futuros que derivan del mismo.

El Capítulo 8 recoge las referencias bibliográficas utilizadas en la elaboración del estudio.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 Herramientas para modelación computacional

#### 2.1.1 Modelos matemáticos de redes de distribución de agua potable

En cierta manera se puede decir que fue a partir del año 1845, con la publicación de la ecuación de Darcy-Weisbach (1845), que comenzó a desarrollarse con intensidad el estudio de las redes de agua. Desde ese momento, el progreso en la materia ha sido ininterrumpido durante todo el siglo XX y hasta la actualidad, tal como muestra la Tabla 1 (Ramalingam et al., 2003).

Tabla 1 - Cronología de métodos de análisis de RDA por periodos (Ramalingam et al., 2003)

Periodo	Año	Autor	Método / Aplicación
I	1845	Darcy y Weisbach	Fórmula para la pérdida de carga para caudal a través de una tubería.
	1892	Freeman	Solución gráfica
	1905	Hazen y Williams	Fórmula para la pérdida de carga para caudal a través de una tubería y método de tubería equivalente.
II	1934	Camp and Hazen	Analizador de redes eléctricas.
	1936	Cross	Técnica de relajación.
	1956	McIlroy	Analizador de flujo McIlroy
	1957	Hoag y Weinberg	Adaptación del método Hardy Cross a computadora digital.
III	1963	Martin y Peters	Método de nudo simultáneo.
	1968	Shamir y Howard	Método de expansión simultánea de nudo.
	1970	Epp and Fowler	Método de malla simultánea.
	1972	Wood y Charles	Método lineal.
	1977	Jeppson	Programa comercial de análisis de red basado en método de malla simultánea.
	1980	Wood	KYPIPE - Programa comercial de análisis de red.
	1988	Todini y Pilati	Método del gradiente.
	1994	Rossman	EPANET - Programa comercial de análisis de red.

Hoy en día, el uso de la informática como herramienta para la ingeniería está completamente generalizado. No existe una sola rama del conocimiento en la cual no se recurra a la programación para el desarrollo profesional y de investigación. Las RDA, evidentemente, no son ajenas a este fenómeno.

En general, todas las redes de infraestructura civil se emulan a través de modelos matemáticos. Un modelo matemático podría definirse como una representación simplificada de las relaciones que existen entre los diferentes parámetros y variables que gobiernan la conducta de un fenómeno (Díaz Allué, 1991). Estos modelos tienen la capacidad de resolver los complejos sistemas de ecuaciones que gobiernan el comportamiento del objeto de estudio, ya sea agua potable, agua residual, energía eléctrica, gas, telefonía, y tantos otros más. Respecto a las RDA, el primer modelo fue desarrollado por Hoag y Weinberg en 1957. Lo que ellos hicieron fue adaptar el método de Hardy Cross para resolución de presiones y caudales en redes malladas a una computadora digital y aplicarlo al sistema de distribución de Palo Alto, California (Engineering News-Record, 1957).

Las primeras aplicaciones de esta nueva tecnología fueron el diseño de ampliaciones de grandes RDA, principalmente porque era un problema crítico al cual se enfrentaban en aquel momento los ingenieros y, además, era en las grandes ciudades donde estos software de vanguardia estaban disponibles (Wtr. Wks. Engineering, 1958). A medida que la accesibilidad fue aumentando, comenzaron a estudiarse redes de menor envergadura, en las cuales ya no podían descartarse las tuberías de medianos diámetros ni considerar mallas enteras como simples puntos de consumo, como se hacía para redes de distribución principales (Eggener & Polkowski, 1976).

Con el pasar de los años, aparecieron cada vez más métodos y aplicaciones computacionales. Uno de extraordinaria relevancia fue el método del gradiente desarrollado por Todini y Pilati en 1988. El procedimiento consiste en combinar las ecuaciones de energía de cada tubería con las ecuaciones nodales en cada unión con el objetivo de encontrar soluciones simultáneas de alturas piezométricas en nudos y caudales en líneas. Las ecuaciones no lineales de energía son linealizadas usando la expansión en series de Taylor. Más allá de lo anterior, lo que realmente hizo destacar a esta propuesta fue la inversión de la matriz de coeficientes para resolver las ecuaciones, recurso que resultó ser de gran eficiencia (Todini & Pilati, 1988). Como puede observarse en la Tabla 1, basado en lo anterior surgió el último gran hito en la modelización hidráulica: el desarrollo del software EPANET (Rossman, 2000), el cual es descrito en el apartado siguiente.

Puesto que el presente trabajo se centra en reducción de modelos matemáticos de RDA, resulta trascendente repasar los componentes generales de los mismos. A tal fin, se presentan dos esquemas elaborados por Ulanicki et al. (1998), quien es sin duda un referente en la materia.

De forma sencilla, un modelo de RDA se puede esquematizar como se muestra en la Figura 1. Sus componentes principales son:

- **Controles horarios:**  
Implementados en bombas, válvulas y fuentes.
- **Demandas:**  
Es el caudal de salida de los nudos, que representa el consumo de agua.
- **Condiciones iniciales:**  
El nivel inicial de los reservorios y el estado de bombas y válvulas.
- **Datos de salida:**  
Comprende la presión en nudos, el caudal en líneas y los costes energéticos.

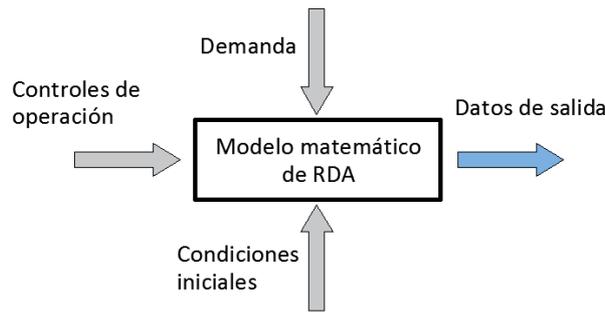


Figura 1 – Esquema conceptual de RDA (Ulanicki et al., 1998)

En una red de distribución de agua, los componentes listados interactúan de forma más o menos compleja de acuerdo al tamaño y características particulares de la misma. La Figura 2 presenta un esquema de estas relaciones. Las ecuaciones de continuidad y conservación de la energía que gobiernan el problema físico deben resolverse teniendo en cuenta las condiciones de contorno que imponen dichos elementos.

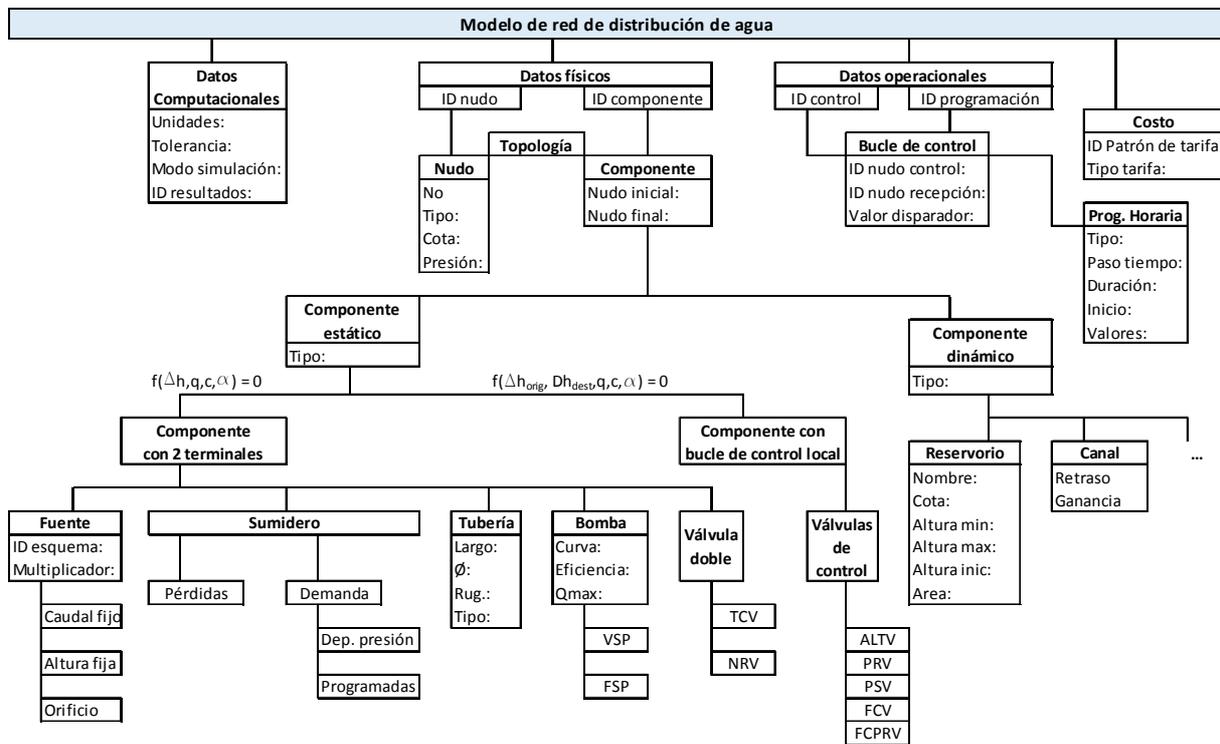


Figura 2 - Esquema de componentes de un modelo de RDA (Ulanicki et al., 1998)

Los modelos matemáticos son en la actualidad la herramienta base para profundizar en el estudio de fenómenos físicos complejos, como es el caso de las RDA. A continuación, se presenta uno de los programas informáticos más utilizados para esta labor.

### 2.1.2 El software EPANET

EPANET es un programa computacional orientado al desarrollo y estudio de redes presurizadas de distribución de agua a través de simulaciones en periodo extendido. Su modelo matemático permite realizar tanto análisis hidráulicos como de calidad de agua. Por su robustez, rapidez y gratuidad de licencia, se ha convertido en el software de RDA más utilizado en el mundo.

Fue desarrollado por la USEPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos) con el objetivo de estudiar la propagación de contaminantes en las redes de agua potable. Para poder realizar este análisis de calidad, era evidentemente necesario contar primero con un modelo hidráulico que representara fehacientemente el comportamiento del flujo a presión en las tuberías. Fue así que nació este programa, de la mano del norteamericano Lewis Rossman.

En cuanto a la modelación hidráulica, el software tiene las siguientes características (Rossman, 2000):

- Tamaño de red analizable ilimitado.
- Calcula la pérdida de carga por fricción usando la fórmula de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach o Chezy-Manning.
- Incluye pérdidas menores por accesorios de la red.
- Permite modelar bombas de velocidad fija y variable.
- Calcula el consumo y coste energético derivado del funcionamiento de las bombas.
- Modela varios tipos de válvulas, incluyendo esclusas, de retención, reguladoras de presión y reguladoras de caudal.
- Permite tanques de almacenamiento con formas irregulares.
- Considera múltiples categorías de demanda en los nudos, cada uno con su propio patrón de consumo variable en el tiempo.
- Permite modelar consumos dependientes de la presión (emisores).
- Puede basar el funcionamiento del sistema en controles simples de nivel de tanque o de tiempo y en controles complejos basados en reglas de operación.

Respecto al análisis de calidad, el programa se caracteriza por (Rossman, 2000):

- Modelar el movimiento de un material trazador no reactivo a través de la red y a lo largo del tiempo.
- Modelar el movimiento y el destino de un material reactivo a medida que crece (p. ej., un subproducto de desinfección) o decrece (p. ej., cloro residual) con el tiempo.
- Modelar la edad del agua en la red.
- Rastrear el porcentaje de flujo desde un nodo dado que llega a todos los demás nodos a lo largo del tiempo.
- Modelar reacciones tanto en el flujo interno como en la pared de la tubería.
- Utilizar cinética de orden  $n$  para modelar reacciones en el flujo interno de la tubería.
- Utilizar cinética cero o de primer orden para modelar reacciones en la pared de la tubería.
- Considerar las limitaciones de transferencia de masa al modelar las reacciones en la pared de la tubería.
- Permitir que las reacciones de crecimiento o decaimiento procedan hasta un límite de concentración.

- Emplear coeficientes de velocidad de reacción global que pueden modificarse tubo a tubo.
- Permitir que los coeficientes de velocidad de reacción de la pared se correlacionen con la rugosidad de la tubería.
- Permitir la concentración variable en el tiempo o entradas en masa en cualquier lugar en la red.
- Modelar tanques de almacenamiento como mezcla completa, flujo de tapón o reactores de dos compartimientos.
- A partir de las características mencionadas, EPANET puede estudiar fenómenos de calidad del agua como:
  - Mezcla de agua de diferentes fuentes.
  - Edad del agua en todo el sistema.
  - Pérdida de residuos de cloro.
  - Crecimiento de subproductos de desinfección.
  - Seguimiento de eventos de propagación de contaminantes.

Sin duda, lo que extendió considerablemente el uso de EPANET en el mundo científico y profesional fue la rapidez y precisión con la que el software realiza los cálculos matemáticos. Como se mencionó al inicio de este capítulo, este programa aplica el renombrado método del gradiente (E Todini & Pilati, 1988), también conocido como modelo de nudo.

Las cuatro ecuaciones principales que resuelve el programa para encontrar una solución hidráulica son las siguientes (Rossman, 2000; Iglesias et al., 2004):

- Relación entre la pérdida de carga para una tubería que va del nudo  $i$  al nudo  $j$  y el caudal que discurre por dicha tubería:

$$H_i - H_j = h_{ij} = rQ_{ij}^n + mQ_{ij}^2 \quad (1)$$

Donde:

$H_i$  = altura piezométrica en el nudo  $i$  o  $j$ .

$h_{ij}$  = pérdida de carga entre el nudo  $i$  y el nudo  $j$ .

$r$  = coeficiente de resistencia.

$Q_{ij}$  = caudal que discurre por la tubería entre el nudo  $i$  y el nudo  $j$ .

$m$  = coeficiente de pérdidas menores.

- Condición de equilibrio para los caudales en todos los nudos:

$$\sum_j Q_{ij} - D_i = 0 \text{ para } i = 1, \dots, N \quad (2)$$

Donde:

$D_i$  = caudal de demanda en el nudo  $i$ , el cual por convención se toma como positivo cuando entra al nudo.

Planteadas las dos primeras ecuaciones, el objetivo consiste en encontrar, a partir de los nudos con altura prefijada (reservorios), una solución para las alturas  $H_i$  en los restantes nudos y para los caudales  $Q_{ij}$  en todas las líneas, acorde a las ecuaciones (1) y (2). Para ello, se utiliza el método de resolución del gradiente, el cual comienza adoptando valores de caudal para las tuberías sin reparar en el

cumplimiento de la ecuación de continuidad. Es un proceso iterativo, en el cual a cada paso se obtienen las alturas piezométricas en los nudos a través de la resolución del siguiente sistema de ecuaciones:

$$A H = F \quad (3)$$

Donde:

$A$  = matriz Jacobiana (NxN).

$H$  = vector de incógnitas nodales (Nx1).

$F$  = vector de términos independientes (Nx1).

En esta etapa es que se implementa la aportación que realiza Rossman (1994) y debido a la cual se consigue una considerable velocidad de resolución. El sistema de ecuaciones lineales (3) se resuelve utilizando un método de matriz dispersa basado en la reordenación de los nudos (George and Liu, 1981). Una vez que esta reordenación es realizada, se lleva a cabo una factorización simbólica para que solo sea necesario almacenar y operar en memoria los elementos distintos de cero de la matriz Jacobiana "A". Esto solo se realiza una sola vez al inicio del análisis.

Una vez que han sido obtenidas las alturas piezométricas en los nudos mediante la resolución de la ecuación (3), se calculan los nuevos caudales a través de la expresión:

$$Q_{ij} = Q_{ij} - (y_{ij} - p_{ij}(H_i - H_j)) \quad (4)$$

Donde:

$H_i$  = altura piezométrica en el nudo i o j.

$Q_{ij}$  = caudal que discurre por la tubería entre el nudo i y el nudo j.

$y_{ij}$  = factor de corrección del caudal.

$p_{ij}$  = es la inversa de la derivada respecto al caudal, de la pérdida de carga en la línea que va del nudo i al j.

Si la suma del valor absoluto de la variación del caudal respecto al caudal total de cada línea es mayor que una cierta tolerancia pre establecida, las ecuaciones (3) y (4) vuelven a resolverse. Esto es extendido a todas las líneas del modelo. Si la tolerancia no es excedida, el cálculo se da por concluido.

Se han repasado hasta aquí los fundamentos principales del software EPANET relacionados con el análisis hidráulico. El proceso de cálculo completo, así como los procedimientos seguidos por el programa para el análisis de calidad del agua no son presentados en este trabajo. Su descripción puede hallarse en el manual redactado por su creador (Rossman, 2000).

### 2.1.3 La Toolkit de EPANET

A las bondades de EPANET respecto al cálculo hidráulico se le suma otra característica fundamental: que su código es abierto. Para que un software sea considerado de tal manera, la distribución de su versión original y modificada debe ser gratuita, su código fuente debe ser accesible y modificable y su utilización no debe interferir con el uso de otro programa. Lo interesante de este concepto es que permite generar desarrollos colaborativos entre los miembros de la comunidad científica y así alcanzar resultados colectivos muy superiores a los que podrían lograrse de forma individual.

Por otro lado, para poder operar con EPANET de forma más rápida y eficiente, se ha desarrollado un paquete de herramientas informáticas conocidas como Toolkit. La Toolkit es una biblioteca de enlaces

dinámicos cuyo objetivo es brindarle al usuario la posibilidad de ejecutar las funciones que tienen disponibles en la interfaz del programa, pero llamándolas a través de un código de programación. Dicho en otras palabras, habilita a utilizar el software mediante programación para adaptar el cálculo a necesidades específicas, lo cual tiene evidentes ventajas en cuanto a eficiencia.

Algunas de las principales tareas que se realizan con la ayuda de la Toolkit son el desarrollo de algoritmos de optimización (por ejemplo: disminución de costes energéticos, localización de estaciones de desinfección, selección de tuberías a reemplazar), algoritmos de simplificación (por ejemplo: reducción topológica de redes para facilitar su interpretación, para utilizarla en algoritmos de simplificación), determinación de curvas de consigna (mínima presión en cabecera que satisface las necesidades de presión mínima en toda la red) y muchas otras más.

Para escribir su código, el programador cuenta con una librería con numerosas funciones que, convenientemente utilizadas, le permiten realizar casi la totalidad de funciones disponibles en la interfaz gráfica del programa. Algunas de las más sobresalientes son mostradas en la

Tabla 2:

*Tabla 2 - Funciones de la Toolkit de EPANET (Vegas Niño et al., 2017)*

Tarea	Funciones	
Ejecutar una simulación completa en una sola línea de comandos	ENepanet	
Abrir y cerrar la librería dinámica de Epanet	ENopen	ENclose
Recuperar información acerca de los nudos de la red	ENgetnodeindex ENgetnodeid	ENgetnodetype ENgetnodevalue
Recuperar información acerca de las líneas de la red	ENgetlinkindex ENgetlinkvalue ENgetlinktype	ENgetlinknodes ENgetlinkid
Recuperar información de las curvas de modulación	ENgetpatternid ENgetpatternindex	ENgetpatternlen ENgetpatternvalue
Obtener otra información de la red	ENgetcontrol ENgetqualtype ENgetoption ENgetversion	ENgetcount ENgetflowunits ENgettimeparam
Establecer nuevos valores para los parámetros de red	ENsetcontrol ENsetnodevalue ENsetlinkvalue ENaddpattern ENsetpattern	ENserpatternvalue ENsetqualtype ENsettimeparam ENsetoption
Guardar y utilizar ficheros de resultados de análisis hidráulico	ENsavehydfile	ENusehyfile
Ejecutar un análisis hidráulico	ENSolveH ENopenH ENinitH	ENrunH ENnextH ENcloseH
Ejecutar un análisis de calidad del agua	ENSolveQ ENopenQ ENinitQ ENrunQ	ENnextQ ENstepQ ENcloseQ

En el año 2019, la versión 2.2 de EPANET fue publicada. Este lanzamiento incluyó nuevas funciones de la Toolkit que permiten, entre otras cosas, la eliminación directa de nudos y líneas. Anteriormente, estas operaciones debían realizarse editando el fichero “.inp”, lo cual lo tornaba muy poco eficiente. La Tabla 3 presenta algunas de las nuevas operaciones que actualmente pueden ejecutarse.

Tabla 3 – Funciones de la Toolkit EPANET 2.2 2019

Tarea	Función
Crear nuevo proyecto EPANET	EN_createproject
Eliminar un proyecto EPANET	EN_deleteproject
Inicializar un proyecto EPANET	EN_init
Establecer unidades de caudal	EN_setflowunits
Añadir un nudo al proyecto	EN_addnode
Añadir una línea al proyecto	EN_addlink
Añadir un control simple al proyecto	EN_addcontrol
Añadir una regla de control al proyecto	EN_addrule
Eliminar un nudo del proyecto	EN_deletenode
Eliminar una línea del proyecto	EN_deletelink
Eliminar un patrón de tiempo del proyecto	EN_deletepattern
Eliminar una curva de información del proyecto	EN_deletecurve
Eliminar un control simple del proyecto	EN_deletecontrol
Eliminar una regla de control del proyecto	EN_deleterule
Establecer el ID de un nudo	EN_setnodeid
Establecer parámetros de un nudo	EN_setjuncdata
Establecer parámetros de un tanque	EN_settankdata
Establecer el ID de una línea	EN_setlinkid
Establecer nudo inicial y final de una línea	EN_setlinknodes
Establecer el tipo de línea	EN_setlinktype
Establecer parámetros de una línea	EN_setpipedata
Recuperar el tipo de modelo de demanda	EN_getdemandmodel
Establecer el tipo de modelo de demanda	EN_setdemandmodel
Añadir una categoría de demanda a un nudo	EN_adddemand
Eliminar una categoría de demanda de un nudo	EN_deletemand
Recuperar el índice de una categoría de demanda	EN_getdemandindex
Recuperar el ID de la categoría de demanda de un nudo	EN_getdemandname
Establecer el ID de la categoría de demanda de un nudo	EN_setdemandname
Establecer el patrón de tiempo de la categoría de demanda de un nudo	EN_setdemandpattern
Establecer el ID de un patrón de tiempo	EN_setpatternid
Establecer el ID de una curva de datos	EN_setcurveid
Recuperar el tipo de curva de datos	EN_getcurvetype
Establecer el índice de la curva de una bomba	EN_setheadcurveindex
Recuperar el número de elementos de una regla de control	EN_getruleinfo
Recuperar el nombre de una regla de control	EN_getruleid

Como se explicará en el apartado 4, en el presente trabajo el proceso de simplificación se realiza de forma automática mediante un código informático desarrollado por el autor. Puesto que las nuevas

funciones de la Toolkit son de gran utilidad para llevar a cabo la esqueletización, estas han sido tenidas en consideración a la hora de escribir el código informático.

Dentro de los lenguajes de programación admitidos por la Toolkit, se encuentra Visual Basic .Net. Este tipo de escritura informática es el que se utiliza para desarrollar la herramienta de simplificación expuesta en el presente trabajo y, por lo tanto, se hará una breve descripción del mismo en el apartado siguiente.

### 2.1.4 El lenguaje Visual Basic .NET

Visual Basic .NET (Microsoft®). es un lenguaje de programación desarrollado por Microsoft que fue lanzado al mercado en el año 2001. Fue diseñado como una versión del Visual Basic para ser ejecutado en .NET Framework. Net. Framework es un entorno para diseñar y ejecutar numerosas aplicaciones, incluidos servicios web (Bucaramanga, 2014) .

El Visual Basic .NET está orientado a objetos. Nació del BASIC (Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Code), tuvo su auge al momento de su publicación y luego fue superado por otros lenguajes (Rivas, 2017), aunque actualmente aún se encuentra dentro de los principales utilizados por los programadores. Para su aplicación es comúnmente usado el Visual Studio, un software desarrollado también por Microsoft.

Visual Studio proporciona un conjunto de herramientas basadas en componentes para el desarrollo de aplicaciones a la vez que otras tecnologías útiles (Microsoft®). Como se muestra en la Figura 3, su interfaz es muy intuitiva y sencilla para el usuario, permitiendo ser utilizada por programadores principiantes.

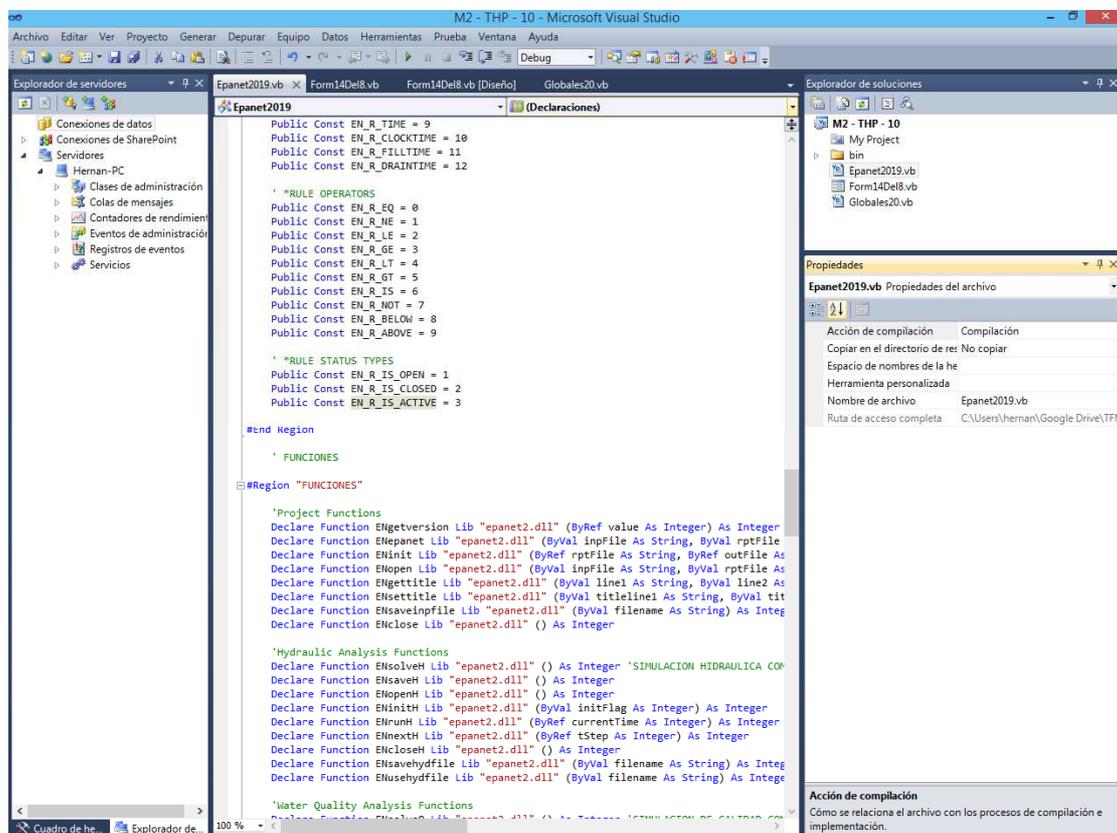


Figura 3 - Interfaz de desarrollo de código Visual Studio

La compatibilidad con la Toolkit de EPANET sumada a la gran cantidad de estudios hidráulicos previos desarrollados con él, hacen que este lenguaje sea seleccionado para ser utilizado como base de herramienta de programación en el presente trabajo.

## 2.2 Estado del arte de la simplificación de modelos de redes de distribución de agua

### 2.2.1 La necesidad de simplificar

Para explicitar porque es necesario simplificar las RDA se debe primero definir lo que es la simplificación. En ese sentido, Walski et al. (2003) la establecen como aquel procedimiento de identificación y selección, para la inclusión posterior en el modelo de RDA, de aquellas partes que tienen un impacto significativo en el comportamiento de la misma.

La necesidad de simplificación es un concepto que ha estado presente a lo largo de toda la historia de los modelos matemáticos de redes de distribución. Es importante recordar que, debido a la indisponibilidad de computadoras, los primeros métodos de resolución de redes malladas debían realizarse en forma manual y por tanto resultaba fundamental reducirlas a su mínima expresión. Esto ocurría por ejemplo al aplicar el renombrado método de Hardy Cross (1936), con el cual por medio de iteraciones sucesivas se puede obtener el flujo en redes malladas a través de la aplicación de coeficientes de corrección (Brkić & Praks, 2019). Esta es una técnica de gran utilidad, pero que pierde practicidad si debe ejecutarse de forma manual.

Si bien durante las décadas de 1970 y 1980 hubo avances en materia computacional, el análisis de RDA estuvo limitado a modelos con unas pocas centenas de tuberías. A partir de 1990, ya con un desarrollo avanzado de software especializado, podría decirse que la simplificación de redes dejó de ser algo estrictamente necesario. Sin embargo, antes de realizar esta afirmación, es esencial considerar los costes económicos que implica un modelo detallado de RDA debido a (Grayman & Rhee, 2000):

- Mayor cantidad de información a ser recolectada, procesada e ingresada al modelo.
- Adquisición de software más costoso que permita crear el modelo.
- Mayor tiempo necesario para generar y analizar el modelo.

Resulta evidente que el nivel de detalle de un modelo matemático de RDA debe estar directamente relacionado con el objetivo que se pretende alcanzar con el mismo. En cierta forma, podría establecerse un nivel creciente de necesidad de detalle en base a la etapa de proyecto en la cual desee utilizarse el modelo. A partir de este concepto, los objetivos de diseño a alcanzar pueden clasificarse en: esquema conceptual, diseño y proyecto ejecutivo. Tomando como base lo anterior, puede afirmarse que al menos en la primer etapa de proyecto una red simplificada presenta mayor utilidad (Hamberg & Shamir, 1988).

El comportamiento de una red simple con tuberías principales que representen fehacientemente la red original (construida o a construir), es mucho más sencillo de comprender. La interpretación del funcionamiento global y la interacción entre los distintos componentes de la RDA se ven facilitados cuando el tamaño del modelo es reducido (Anderson & Al-Jamal, 1995).

En la actualidad, es muy común que las RDA sean construidas a partir de sistemas de información geográfica (GIS). Estos poderosos sistemas tienen la capacidad de integrar distintos tipos de datos (suelo, redes, hidrografía, etc.), por lo que el volumen de información que contienen es extraordinariamente elevado. En el caso de las RDA, cabe destacar que mayor cantidad de datos no

siempre significa mayor precisión (Martínez-Solano et al., 2017). El problema principal que resulta de elaborar un modelo de RDA importando datos de GIS (Shamsi, 2004) es que muy probablemente se estén incluyendo elementos menores tales como hidrantes, conexiones domiciliarias, válvulas y accesorios (Figura 4), a priori, innecesarios (Jung et al., 2007). Este exceso de información no solo afecta a la trabajabilidad del modelo sino que también aumenta los costes asociados al mismo (Grayman & Rhee, 2000). En estos casos, la necesidad de simplificación es indiscutible.

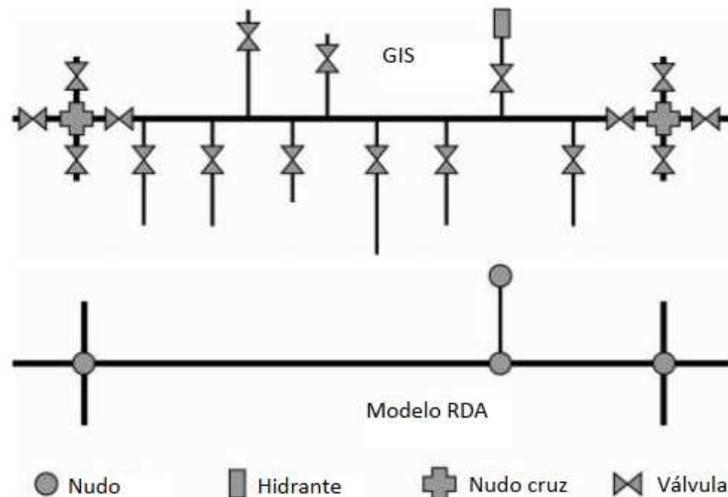


Figura 4 - Representación comparativa entre GIS y modelo de RDA (Jung et al., 2007)

Uno de los usos más extendidos de los modelos matemáticos de las RDA es el de control y operación del abastecimiento. Cada vez es mayor el número de compañías distribuidoras que cuentan con esta herramienta informática para tomar decisiones operativas a corto y largo plazo. Las variables que suelen estar involucradas en la gestión de RDA son demanda horaria de usuarios, caudales en líneas principales, presiones en nudos, nivel de depósitos, esquema de trabajo de bombas y porcentaje de apertura de válvulas. Cualquier RDA, por más pequeña que sea la población a la cual abastece, puede contener decenas o incluso centenas de estos elementos. Basado en lo anterior, es indiscutible afirmar que un modelo detallado no es adecuado para controlar y monitorizar RDA (Duzinkiewicz & Ciminski, 2006). Adicionalmente, la correcta interpretación del funcionamiento estructural de la RDA resulta muy difícil de realizar en estos casos (Perelman & Ostfeld, 2011), por lo que al final se corre el riesgo de cometer errores a causa de una inclusión exagerada de información.

Otra aplicación generalizada de los modelos de RDA es el estudio de diferentes alternativas de operación con el objetivo de minimizar, por ejemplo, costes energéticos. Estos problemas en los cuales están involucradas múltiples variables son frecuentemente resueltos con técnicas de optimización. Mientras más compleja es la red, más opciones debe evaluar el algoritmo optimizador y por tanto, mayor coste computacional y temporal posee (Martinez Alzamora et al., 2014). Simplificar la red supone una reducción considerable del espacio de soluciones, lo que se traduce en disminución de los costes mencionados.

Basados en el análisis realizado hasta aquí se puede afirmar que, a pesar de que el desarrollo computacional permita hoy en día procesar gran cantidad de información, a los fines prácticos una red simplificada resulta en general más conveniente. Evidentemente, el nivel de simplificación deberá ser acorde al propósito para el cual se construya el modelo matemático (Hellbach et al., 2011).

## 2.2.2 Metodologías de simplificación

Tal como se ha descrito en los apartados anteriores, existe una vasta historia de modelos matemáticos de RDA. Sin embargo, no se cuenta en la actualidad con un procedimiento estandarizado para realizar simplificaciones de las mismas, principalmente por la gran variedad de particularidades que poseen este tipo de infraestructuras. Lo más similar a una regla general de esqueletización es lo propuesto por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos), que sugiere que una red simplificada debe poseer los siguientes elementos (U. S. Environmental Protection Agency, 2005):

- Al menos el 50 por ciento de la longitud total de la tubería de la RDA.
- Al menos el 75 por ciento del volumen de las tuberías de la RDA.
- Todas las tuberías de diámetro mayor o igual a 304,80 mm (12 pulgadas).
- Todas las tuberías de diámetro mayor o igual a 203,20 mm (8 pulgadas) que conectan zonas de presión, influyen en zonas de diferentes fuentes, instalaciones de almacenamiento, áreas de mayor demanda, bombas y válvulas de control, o se sabe o se espera que sean transportadores significativos de agua.
- Todas las tuberías de diámetro mayor o igual a 152,4 mm (6 pulgadas) que conectan áreas remotas de un sistema de distribución a la parte principal del sistema.
- Todas las instalaciones de almacenamiento con controles o configuraciones aplicadas para gobernar el estado abierto / cerrado de la instalación que reflejan las operaciones estándar.
- Todas las estaciones de bombeo activas con controles o configuraciones realistas aplicadas para controlar su estado de encendido / apagado que reflejan las operaciones estándar.
- Todas las válvulas de control activas u otras características del sistema que podrían afectar significativamente el flujo de agua a través del sistema de distribución (Interconexiones con otros sistemas, válvulas entre zonas de presión, etc.).

Como fue expresado, la lista de la USEPA (2005) es una mera sugerencia y deja en manos del responsable de la modelación la aplicación de los criterios de reducción que considere oportunos.

Algunos de los autores que aplican estas recomendaciones son Elsheikh et al. (2013), quienes para construir la RDA de la ciudad de Tanta (Egipto) han tenido que recurrir indefectiblemente a su simplificación. Con las técnicas de la USEPA logran obtener una red reducida en un 50% respecto a la longitud de tuberías y un 86% en cuanto al volumen de las mismas.

A continuación se exponen aquellas metodologías que, debido a su aplicabilidad, han tenido mayor trascendencia en el escenario académico y profesional. Solo a los fines de facilitar la comprensión, los métodos son clasificados en dos grandes grupos (convencionales y alternativos), a pesar de que no exista entre ellos una diferenciación tan distintiva sino que muchos presenten, de hecho, una combinación de técnicas de reducción.

### 2.2.2.1 Métodos basados en técnicas convencionales

Se definen como basados en técnicas convencionales aquellos métodos que, con mayor o menor originalidad, utilizan los procedimientos clásicos de simplificación. En cierta forma, estas operaciones corresponden a los denominados Métodos Elemento a Elemento (Anderson & Al-Jamal, 1995). Tal como su nombre lo indica, estos procedimientos se caracterizan por realizar la reducción de la red de a un componente por vez. Tomando como ejemplo la Figura 5, la eliminación de nudos mediante un método elemento a elemento se ejecutaría comenzando con el nudo B y su línea contigua L<sub>2</sub>, luego

con el nudo D y línea L<sub>3</sub>, luego con el nudo A y línea L<sub>1</sub> y finalmente con el nudo C y línea L<sub>4</sub>. En contrapartida se encuentran aquellos métodos de simplificación global, en los cuales la reducción no se realiza por elemento sino considerando la red, o parte de la misma, como un conjunto simplificable. Ejemplos de este tipo se presentan en el apartado 2.2.2.2.

Si bien hay tantas operaciones de simplificación como especialistas hidráulicos han estudiado el tema, las más comúnmente utilizadas son las presentadas a continuación (Cesario, 1995; Walski et al., 2003).

- **Depuración de elementos de la red:**

Consiste en la eliminación de elementos que no cumplen ciertos requerimientos dimensionales mínimos, sin importar el efecto hidráulico que pudiera tener su eliminación en el resto de la red.

- **Eliminación de nudos terminales:**

Consiste en eliminar aquellos nudos y líneas terminales de la red. Para no generar cambios en el resto de la red, la demanda asociada a los elementos eliminados es relocalizada al nudo base al cual estaba vinculado el ramal terminal. En el caso de la Figura 5, si se eliminara por ejemplo el nudo B, su demanda base se reasignaría al nudo D.

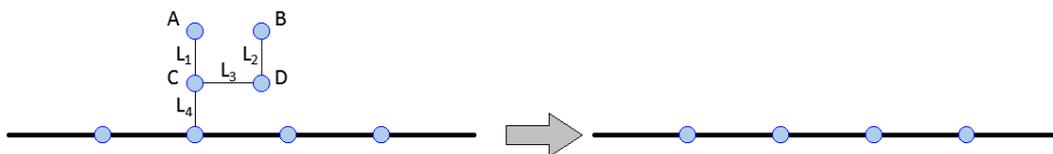


Figura 5 - Simplificación de ramales terminales

- **Eliminación de nudos intermedios:**

Consiste en unir dos tuberías en serie que cumplan ciertos criterios definidos por el usuario que ejecuta la simplificación (p. ej. igual diámetro, igual rugosidad, etc.) y que cuyo nudo intermedio no tenga ninguna otra tubería conectada a él, tal como muestra la Figura 6. Para evitar efectos en el resto de la red, ajustes de los parámetros físicos de la tubería resultante y relocalización de la demanda del nudo intermedio (si existiera) deben ser realizados.



Figura 6 - Simplificación de nudos intermedios

- **Unión de tuberías paralelas:**

Consiste en unir tuberías que tienen igual nudo inicial y final, como grafica la Figura 7. Para evitar efectos en la red, ajustes de parámetros físicos de la tubería resultante deben ser realizados.

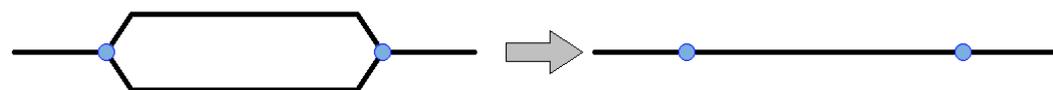


Figura 7 - Unión de tuberías paralelas

- **Eliminación de tuberías para apertura de mallas:**

Es común encontrar en las RDA ciertos sectores de mallas cerradas que imposibilitan alcanzar un nivel de simplificación considerable. Una forma de resolver esto es eliminar una de las tuberías que componen la malla y, de esta manera, lograr la apertura de la misma. Al realizar esto, el resto de las tuberías de la malla se convierten en ramales terminales y por tanto pasar a ser susceptibles de ser simplificados como tales. La Figura 8 grafica lo mencionado.

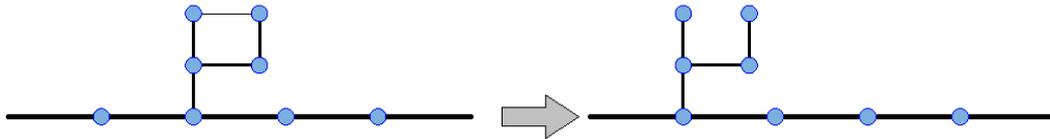


Figura 8 - Eliminación de tuberías para apertura de mallas

Lo crítico de esta operación es definir el criterio con el cual se elige la tubería a ser eliminada. En primera instancia podría considerarse óptimo quitar aquella con menor capacidad de transporte, definida por la ecuación (5). Sin embargo, no siempre la eliminación del conducto de menor  $C_t$  es el que genera el impacto más bajo en el funcionamiento hidráulico de la red por lo cual, es necesario analizar cada caso de forma particular.

$$C_t = \frac{C \cdot D^{2.63}}{L^{0.54}} \quad (5)$$

Donde:

$C$  = coeficiente de rugosidad de Hazen – Williams.

$D$  = diámetro de la tubería en pulgadas.

$L$  = longitud de la tubería en pies.

A partir de las técnicas básicas brevemente descritas, han sido elaborados a lo largo de los años numerosos procedimientos de simplificación. En general, cada autor toma como base los conceptos anteriores y realiza su aporte científico en búsqueda de la mejoría en los resultados. A continuación se presentan algunas de estas aportaciones.

Jiang et al. (2013) aplican algunas de las operaciones mencionadas para simplificar una RDA real compuesta por 600.000 tuberías y 550.000 nudos. Las técnicas que utilizan son eliminación de ramales terminales, unión de tuberías en serie y unión de tuberías paralelas. Ejecutan tres reducciones diferentes, basadas en el diámetro máximo susceptible de ser eliminado (300, 500 y 800 mm). Para evaluar la bondad de los valores obtenidos, definen 6 estaciones de control de presión. Los resultados obtenidos son en cierta forma los esperables: a medida que el nivel de simplificación aumenta, la precisión del modelo reducido disminuye.

Anderson y Al-Jamal (1995) presentan un método encuadrado dentro de lo que ellos denominan “Aproximación por ajuste de parámetros”. Los parámetros a ser ajustados son representados por dos vectores, uno que simboliza las demandas de los nudos y otro que representa la conductancia de las tuberías. El ajuste de parámetros se realiza a través de un método de optimización, cuya función objetivo busca minimizar la diferencia entre los vectores mencionados de la red original y de la red simplificada. Esta función evalúa el caudal de las bombas, el flujo de entrada y salida de los reservorios, el caudal en ciertas líneas de control y la altura piezométrica en determinados nudos de inspección. Para que el procedimiento de optimización sea más eficiente, calculan el gradiente de la función

objetivo utilizando información Jacobiana que obtienen al emplear el método Newton para resolver la hidráulica de la red simplificada. Los resultados obtenidos difieren en menos de un 5% con respecto a la red original.

Otro enfoque es el propuesto por Martínez-Solano et al. (2017), quienes exponen un método para realizar la unión de tuberías en serie o, dicho de otra manera, eliminar nudos intermedios. En primera instancia determinan una ecuación para la obtención del diámetro equivalente de la tubería simplificada que reemplazará a las dos tuberías en serie de la red original. La ecuación está formulada para ser utilizada con la fórmula de Darcy-Weisbach (1845) como ecuación de pérdida de carga por fricción y la ecuación de Swamee – Jain (1976) para la obtención del valor del coeficiente de fricción  $f$ . Cabe recordar que este coeficiente depende del caudal que atraviesa la tubería con lo cual, debe realizarse un proceso iterativo, también propuesto por Martínez-Solano et al., para conseguir su valor. Finalmente presentan una expresión para la obtención de una tubería equivalente con igual tiempo de viaje del agua con respecto a la red original. De esta manera, logran que el método sea aplicable no solo para simplificaciones orientadas al análisis hidráulico sino también, al análisis de calidad de agua.

Otro autor orientado a obtener buenos resultados en cuanto a análisis de calidad es Saldarriaga et al. (2008; 2009). En la búsqueda de una solución para minimizar los errores en el cálculo de contaminantes de agua que mencionan Bahadur et al. (2006), proponen un método de reducción que combina técnicas de simplificación convencionales con el concepto de resiliencia introducido por Todini (2000). El autor italiano define a la resiliencia como la relación entre el superávit de energía entregada a la red y la cantidad máxima de energía que puede ser disipada por la red cumpliendo con los criterios de diseño pre establecidos (Todini, 2008). El objetivo de este índice es valorar la capacidad que tiene la red para hacer frente a fallas en el sistema, concepto que está relacionado con la redundancia hidráulica. Volviendo a la propuesta de Saldarriaga et al., el procedimiento iterativo de esqueletización puede describirse de la siguiente manera:

**1. Eliminación de tuberías redundantes bajo el criterio de Resiliencia**

Para cada iteración se evalúa el impacto que tiene la remoción de cada tubería en el índice de resiliencia. Aquella que tenga menor impacto y cuya eliminación no produzca la desconexión de ningún nudo con demanda, es seleccionada para eliminación.

**2. Eliminación de ramales terminales:**

Previa relocalización de sus demandas, los nudos terminales son removidos de la red.

**3. Unión de tuberías en serie:**

Tuberías en serie con nudos intermedios sin demanda son fusionadas en una sola línea equivalente que genera igual pérdida de altura piezométrica.

Si bien los resultados obtenidos son óptimos en cuanto a análisis hidráulico, no son satisfactorios en relación a análisis de calidad de agua.

Siguiendo en su intento por mejorar la precisión en los valores de calidad de los modelos reducidos, Saldarriaga et al. (2012) proponen otro procedimiento de simplificación. El método se fundamenta en corregir la concentración de cloro en los nudos de la red simplificada mediante un factor calculado en base a los nudos originales. Para obtener la RDA reducida, combinan las técnicas convencionales con un interesante concepto: “Poder disipador Unitario” (PU). EL PU mide la cantidad de energía que se disipa en una tubería y se define como el producto entre el caudal y la caída de altura piezométrica generada (Todini, 2000). El proceso de simplificación se compone de cuatro etapas:

**1. Agregación de demanda:**

Se concentran las demandas en unos pocos nudos representativos, manteniendo el total consumido en el sistema.

**2. Algoritmo basado en PU:**

Es un proceso iterativo en el cual en cada iteración se reconocen todas aquellas tuberías que pueden ser eliminadas sin dejar nudos de consumo desconectados de la red. Para todas ellas se calcula el PU y se elimina aquella que tiene el menor valor; es decir, aquella cuya eliminación generará menor impacto en la red reducida.

**3. Ramales terminales:**

Aquellos nudos terminales cuyas demandas han sido relocalizadas son removidos de la red.

**4. Tuberías en serie:**

Se refiere a la fusión de tuberías en serie mediante la creación de una equivalente en cuanto a fricción y pérdidas menores.

Obtenida la red simplificada, se aplican correcciones en el cálculo de la concentración de cloro y en la concentración del cloro misma, a partir de correlacionar el modelo reducido con el original. Los resultados obtenidos permiten afirmar que finalmente la metodología propuesta por los autores es óptima.

*2.2.2.2 Métodos alternativos*

Se definen como métodos alternativos aquellos que emplean técnicas de simplificación distintas a las convencionales tratadas en el apartado anterior. Estos procedimientos, combinan con originalidad diversas herramientas matemáticas e hidráulicas para lograr esqueletizar redes de una forma diferente a la clásica y obtener de esta manera resultados en muchos casos superadores.

Existe una gran cantidad de artículos relacionados con este tema. A los fines prácticos, se exponen a continuación algunos de los considerados más relevantes.

Uno de los procedimientos de simplificación más renombrados es el propuesto por Ulanicki et al. (1996). El mismo se basa en reducir la RDA (u otras redes de infraestructura similares) utilizando un método matemático consistente en un sistema de ecuaciones algebraicas no lineales. Es en ese concepto en el cual radica la verdadera ventaja de la propuesta, ya que el proceso de esqueletización garantiza que la red resultante preserve la no linealidad del sistema original.

El procedimiento es dividido por los autores en las siguientes etapas:

1. Formulación del modelo no lineal.
2. Linealización del modelo.
3. Reducción lineal del modelo utilizando el procedimiento de eliminación de Gauss.
4. Recuperación del modelo no lineal reducido a partir del modelo lineal reducido.

Si bien el método es presentado utilizando la ecuación de coeficiente de pérdidas de carga de Hazen-Williams (1905), este admite la aplicación del factor de fricción de Darcy-Weisbach (1845). Con el objetivo de validar la utilidad de la propuesta, son evaluadas diferentes RDA bajo distintas condiciones de funcionamiento. Los resultados obtenidos confirman que el método logra la representación con gran precisión de las presiones en la red simplificada. Otra ventaja mencionada es que, debido a su algoritmo, el tiempo que demora el procedimiento es muy bajo. Finalmente, cabe destacar que los nudos a ser removidos deben ser seleccionados a priori por el usuario, algo que puede ser poco

práctico para grandes modelos de RDA. El único punto negativo que posee esta metodología es que el modelo reducido no preserva la distribución de energía en la red (Paluszczyszyn, 2015).

Shamir y Salomons (2008) aplican el método de Ulanicki (1996) para reducir modelos de RDA combinado con un algoritmo de optimización de costes energéticos. El algoritmo va eliminando paso a paso nudos y líneas y redistribuyendo demandas. Las variables de ajuste son las bombas y válvulas de la red mientras que la validación se realiza comparando la evolución de la altura de los tanques de agua. De esta manera, logran obtener hora a hora la posición de operación del sistema que menor coste energético posee, obteniendo ahorros de hasta un 10% en el caso particular de la RDA de Haifa, Israel.

Algo similar a lo anterior es realizado por Paluszczyszyn et al. (2011). Ellos utilizan el método de Ulanicki (1996) para reducir las RDA y poder aplicarles una estrategia de optimización en línea para no solo energía sino también pérdidas de agua. El esquema de trabajo se muestra en la Figura 9. Este trabajo, al igual que muchos anteriores, deja en evidencia que para tareas de optimización es imprescindible contar con RDA simplificadas.

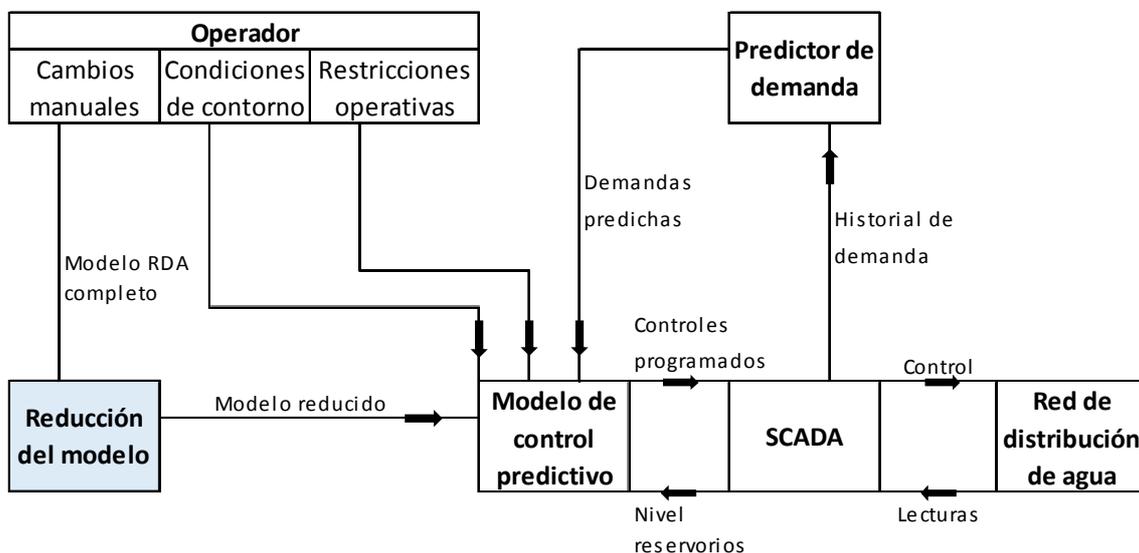


Figura 9 - Esquema de control planteado (Paluszczyszyn et al., 2011)

Otros autores que utilizan el algoritmo de simplificación de Ulanicki (1996) son Perelman et al. (2008). Lo que proponen es ejecutar primero una agregación de nudos basada en la calidad del agua y posteriormente realizar una simplificación hidráulica utilizando el método de Ulanicki (1996). Los resultados obtenidos presentan gran precisión en cuanto a presiones y niveles de concentración de sustancias.

Continuando en la misma línea de trabajo, Paluszczyszyn et al. (2015) desarrollan una herramienta informática para simplificación de RDA denominada "Simplifier2" ( Figura 10). Este software aplica el método de Ulanicki (1996) de forma automática y tiene como objetivo facilitar la implementación del mismo.

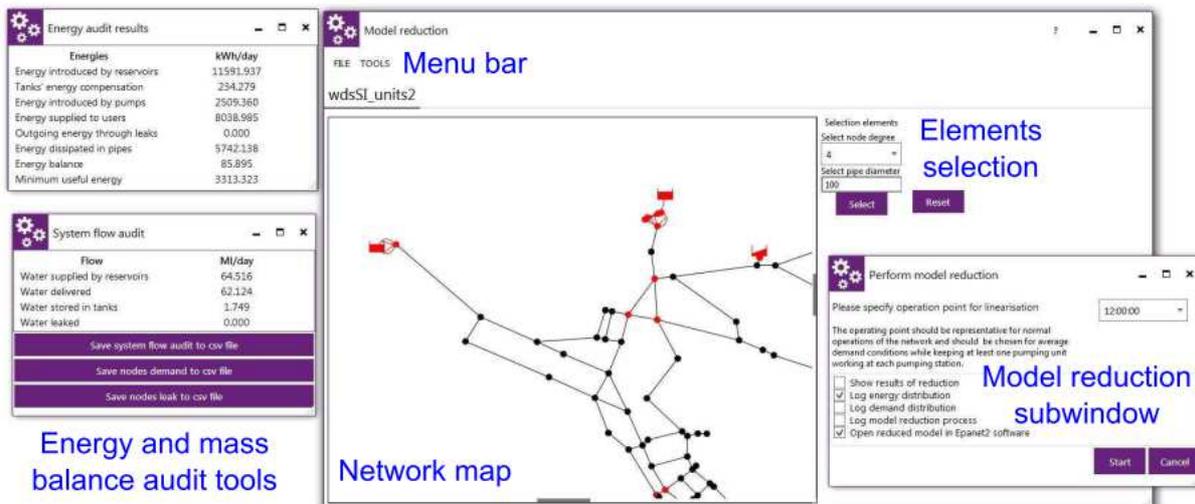


Figura 10 - Interfaz de Simplifier2 (Paluszczyszyn et al., 2015)

Un enfoque diferente es el planteado por Duzinkiewicz y Cimiski (2006). Su motivación por simplificar proviene de aceptar que una RDA detallada no es apta para tareas de monitoreo y control, tal como se ha mencionado en capítulos anteriores. Un concepto interesante resaltado por los autores es que las dimensiones del modelo influyen en el tiempo necesario para su desarrollo, en el tiempo requerido para resolver problemas de optimización y, finalmente, en la precisión con la que el modelo representa a la realidad. Por tales motivos, afirman que la selección del grado de simplificación debe ser una solución de compromiso entre todos estos factores.

El método de Duzinkiewicz y Cimiski consiste en reemplazar un conjunto de nodos con características de demanda similares (residencial, industrial, comercial, etc.) por un solo nodo que los represente a todos. Las tuberías relacionadas también son simplificadas, y sus parámetros dimensionales son calculados en base a minimizar las diferencias de presión y caudal con la red original. La Figura 11 esquematiza lo mencionado. Los resultados obtenidos demuestran que gracias a la aplicación de la función objetivo, se obtienen mejores resultados que al utilizar las técnicas de simplificación convencionales.

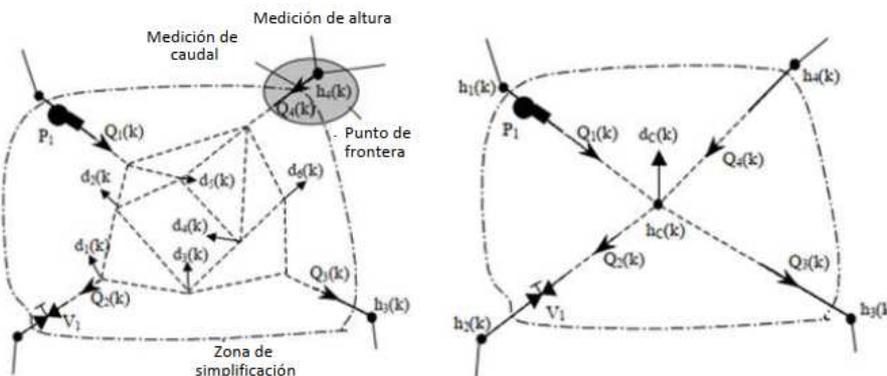


Figura 11 - Sector original (izq.) y sector simplificado (der.)(Duzinkiewicz & Ciminski, 2006)

En otra línea de técnicas de reducción se encuentra el procedimiento creado por Deuerlein (2008), quien se basa en la teoría de grafos para ejecutar la reducción de redes de agua. Este método se enmarca dentro de los denominados "Métodos de agregación", que constituyen una forma particular

de simplificar redes a través de la agrupación de las componentes de la misma, como el de Duzinkiewicz y Cimiski. En su estudio, Deuerlein propone que la red sea dividida en bosque (conjunto de ramales terminales denominados “árboles”) y núcleo (bloques internos conectados por “puentes”). El método se basa en primero identificar los distintos componentes mencionados de la red y luego encontrar la interrelación entre ellos para, finalmente, realizar simulaciones hidráulicas, identificar áreas de demanda y esqueletizar la red. El proceso presentado se puede apreciar en la Figura 12.

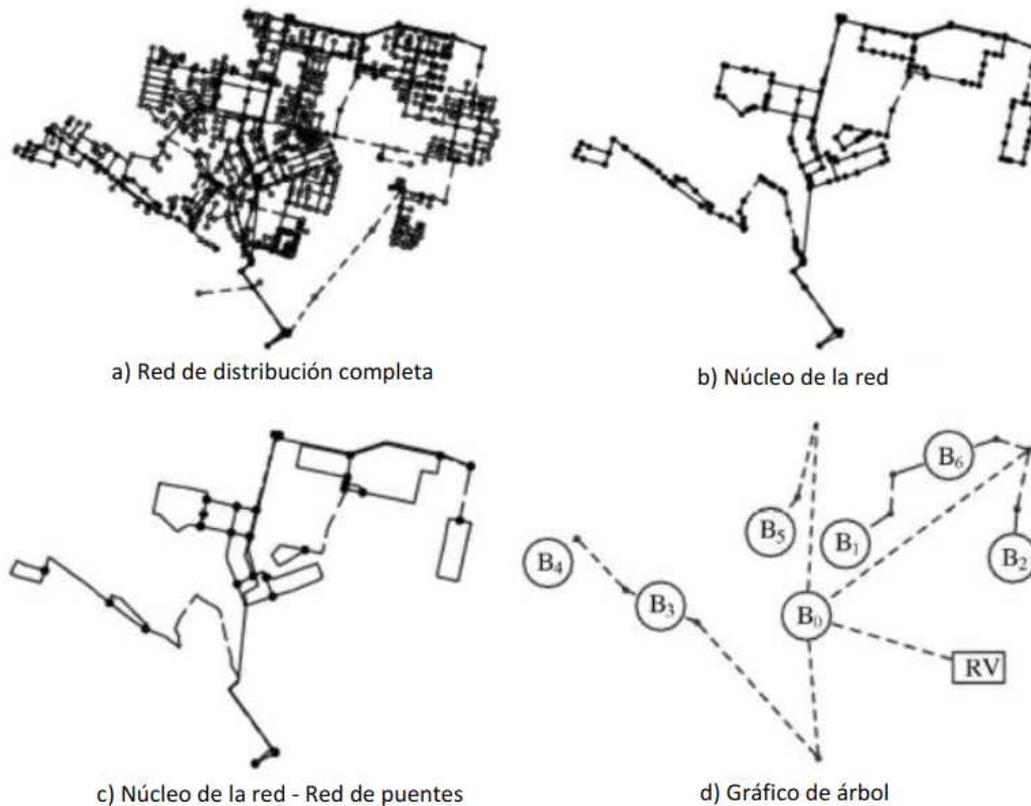


Figura 12 – Esquema de simplificación de RDA usando teoría de grafos (Deuerlein, 2008).

Otro método de agregación es el publicado por Perelman y Ostfeld (2011), quienes proponen descomponer el modelo de la RDA para facilitar su comprensión y utilización pero, a diferencia de Deuerlein, la dividen en lo que denominan “clústeres”. Los autores definen a un clúster como una porción de la red con características similares en cuanto a estructura y conectividad. El método consiste en definir los clústeres y la interconexión entre ellos a través de la dirección de flujo obtenido durante una simulación hidráulica. El resultado obtenido es una matriz que resume la conectividad entre cada clúster, definida como fuerte o débil, la cual puede ser útil para la interpretación del funcionamiento de la red. Un ejemplo práctico del procedimiento puede observarse en la Figura 13 de la página siguiente.

En la misma línea de trabajo que Deuerlein (2008) y Perelman (2011), Qin y Boccelli (2017) proponen simplificar la red a través de la formación de clústeres con nudos de con características similares en cuanto a calidad de agua. Lo que los autores intentan resolver es la falencia que suelen representar los modelos simplificados al intentar reproducir fehacientemente los análisis de calidad en la RDA reducida. La formación de los clústeres se realiza a partir del estudio de las relaciones de caudal (entrada y salida) entre cada par de nudos usando un coeficiente de impacto. Con esta herramienta,

se puede obtener información sobre los “caminos” que realiza el agua dentro de la red. Finalmente, a través de un algoritmo, se agrupan en clústeres los nudos con similares caminos de agua, lo cual también implica similares características de calidad de agua. Los resultados obtenidos son óptimos y brindan información valiosa para la localización de sensores de calidad, entre otras cosas.

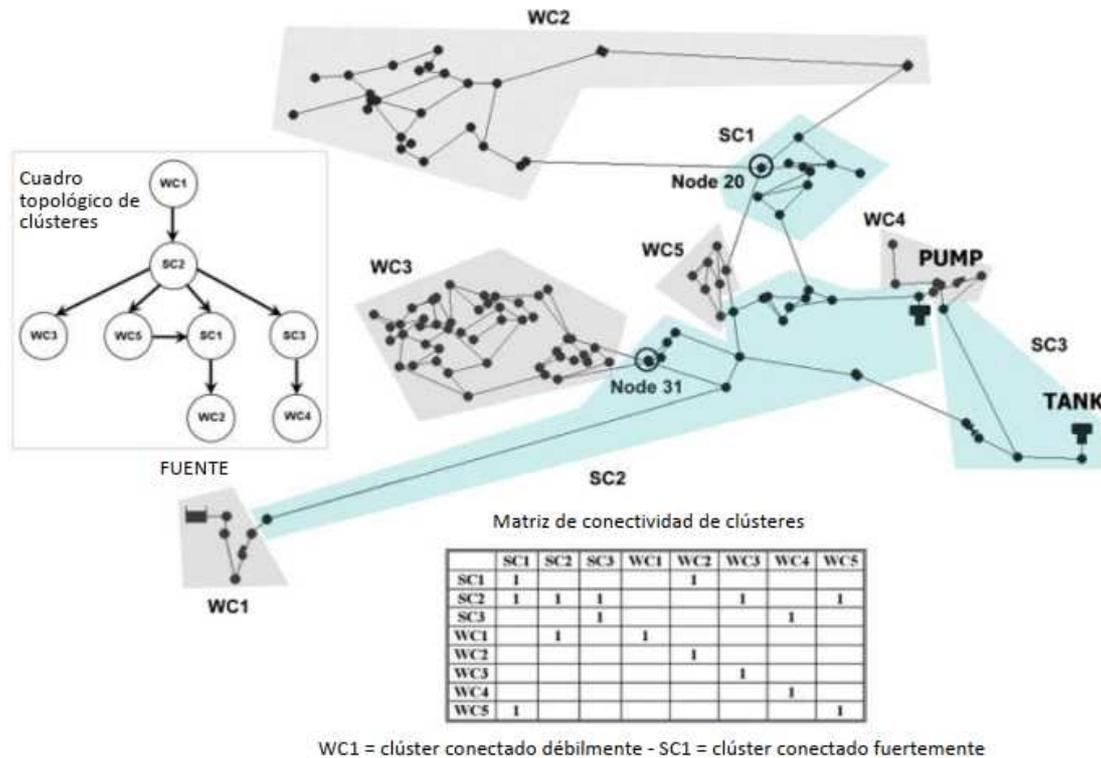


Figura 13 - Ejemplo de división de RDA en clústeres (Perelman & Ostfeld, 2011).

Otro concepto que ha sido empleado para simplificación de redes es el de curva de consigna. La curva de consigna se define como la presión necesaria en los puntos de inyección de la red para garantizar a toda hora la presión mínima en los puntos de consumo (Martinez Alzamora & Vidal, 1996). Esta curva es usualmente utilizada para regular el funcionamiento de sistemas de bombeo con el objetivo de reducir costes energéticos. Ilaya-Ayza et al. (2017) proponen realizar una simplificación de la RDA utilizando como criterio el grado de influencia que tiene cada tubería en la curva de consigna. Básicamente, la variación de la curva de consigna al eliminar la tubería en cuestión y, si la diferencia es admisible, procede con la remoción. En la Figura 14 se puede observar cómo afecta la eliminación de conducciones a la curva de consigna.

Martínez-Solano et al. (2014) presentan la aplicación del concepto de curva de consigna orientado a mantener no la presión sino los parámetros de calidad mínimos en la red. Para ello plantean ejecutar el análisis de calidad basado en el modelo de flujo pistón, imponiendo una dirección del flujo determinada en las tuberías. Esto es lo que ocurre en los ramales terminales y, por tanto, el método es aplicable a dichos sectores de las RDA. El procedimiento tiene como resultado la obtención de la concentración de una cierta sustancia que posee un nudo recibida desde otro nudo. La aportación importante que realiza esta técnica es que el cálculo puede hacerse de forma inversa, es decir, conocer la concentración de sustancia (por ejemplo Cloro) que debo tener a cada hora en un cierto nudo para garantizar la concentración mínima de dicho elemento en los nudos aguas abajo.

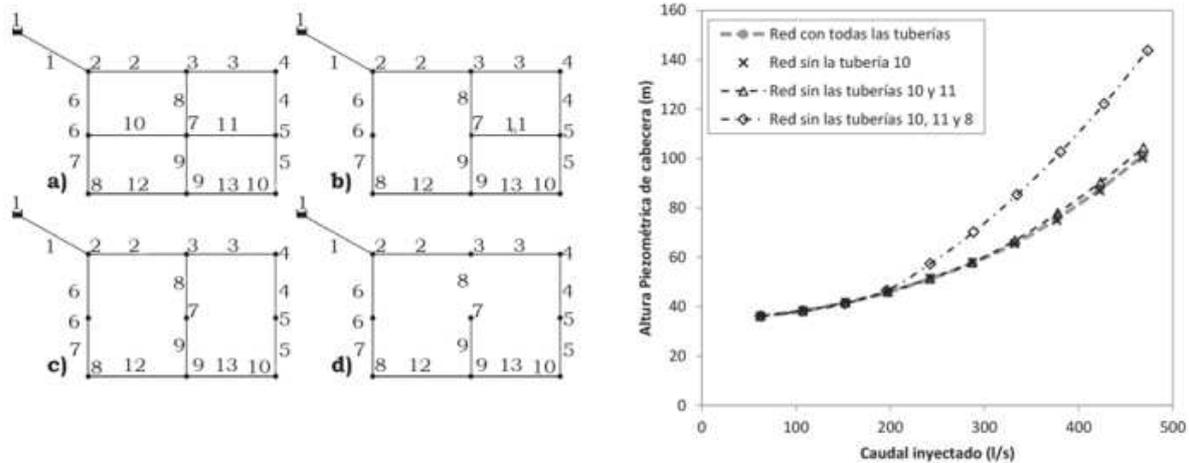


Figura 14 Izq.: Red modelo para la esqueletización, a) red con todas las tuberías, b) red sin la tubería 10, c) red sin las tuberías 10 y 11, d) red sin las tuberías 10, 11 y 8. Der.: Curvas de consigna tras eliminar tuberías de la red. (Ilaya-Ayza et al., 2017)

Con el mismo objetivo de contemplar la información referente a la calidad del agua en los ramales terminales de las redes simplificadas, Abokifa et al. (2020) desarrollan recientemente un software llamado WUDESIM. Esta herramienta informática tiene como finalidad permitir a los usuarios modelar el transporte de sustancias utilizando la dispersión como mecanismo de transporte. En relación a la esqueletización, logra corregir los errores que se producen por la agregación espacial de la demanda en los ramales terminales. Para ello, el software aplica tres factores de corrección: tiempo de residencia, coeficiente de dispersión y demanda de pared. El programa alcanza altos niveles de precisión a la vez que resulta particularmente práctico debido a su compatibilidad con EPANET, con lo cual es una herramienta atractiva para los especialistas de la materia.

Si algo tienen en común los autores de los artículos mencionados hasta aquí es que el método de simplificación y la precisión necesaria en la RDA reducida deben estar ligados al objetivo para el cual se desea realizar la esqueletización. Bajo esa premisa, Huang et al. (2019) destacan que en general las RDA simplificadas bajo condiciones estacionarias no suelen representar de manera fehaciente los efectos de los fenómenos transitorios que se producen en la red. A partir de ello, desarrollan un método en el cual al unir tuberías en serie no solo calculan la pérdida de carga equivalente sino que también buscan obtener equivalencias en el tiempo de viaje del agua y en la amplitud de la onda generada por el transitorio. Los resultados obtenidos son acertados.

Para finalizar esta sección se presenta el proceso de reducción de redes desarrollado por Giustolisi et al. (2010), el cual está basado en el método del gradiente de Todini y Pilati (1988). En (Giustolisi & Todini, 2009), los autores demuestran que la asignación de las demandas a los nudos extremos de las tuberías, cuando de facto se localizan distribuidas a lo largo de ellas, trae aparejado errores en la representación de las pérdidas de carga. Puesto que afirman que esto puede generar problemas en la calibración de los modelos, desarrollan un método para solventarlo, al cual denominan EGGA ("Enhanced global gradient algorithm."). Este aporte se centra en corregir la matriz diagonal de demandas acorde a la localización exacta de los consumos en la línea.

Posteriormente, a partir del EGGA comentado, Giustolisi et al. en (2010) desarrollan una metodología de simplificación de RDA. Esta estrategia de reducción topológica está basada en la eliminación de

nudos intermedios, es decir, nudos conectores de tuberías en serie susceptibles de ser fusionadas. El proceso consiste en tres pasos:

1. Identificación de nudos intermedios mediante el análisis de la matriz de topología.
2. Eliminación uno a uno de los nudos intermedios de la matriz de nudos y de las tuberías asociadas a dichos nudos. En este paso la información de los elementos borrados es almacenada.
3. Creación de una nueva tubería en la matriz de líneas, antes de eliminar el nudo siguiente. La nueva tubería es creada a partir de la información previamente almacenada.

La aportación importante que realiza la simplificación con EGGGA es que se preservan el balance de masa y energía del sistema, a la vez que el estado original de las variables de la red y las condiciones de contorno.

### 2.2.3 Efectos de la simplificación

Al inicio de este capítulo se definió a la simplificación como el procedimiento mediante el cual se incluyen las partes significativas de un modelo, en este caso, de RDA. Esto implica que hay elementos que son excluidos y, por lo tanto, la red reducida nunca arrojará exactamente los mismos resultados que la original. El desafío reside entonces en encontrar y aplicar el método adecuado que permita obtener valores lo suficientemente precisos en relación al objetivo del modelo. En otras palabras, el criterio de aceptabilidad de resultados debe ser definido en base a la finalidad para la cual se construya el sistema reducido.

Por lo mencionado anteriormente es que resulta interesante conocer algunas de las limitaciones que suelen presentar los modelos simplificados. Esto ayudará a la persona que ejecuta la simplificación a elegir la metodología de reducción que mejor se adapte a su caso particular de estudio.

Grayman y Rhee (2000) evalúan las consecuencias de la simplificación de RDA en términos de precisión, uso, coste, parametrización y calibración. Para ello, realizan una reducción elemento a elemento considerando cuatro niveles de simplificación, basados principalmente en el diámetro de las tuberías. Aplicando lo anterior a un caso de estudio particular, obtienen cuatro versiones de red simplificada, sobre la cual valoran los resultados hidráulicos y de calidad, y los comparan con la red original. Las conclusiones a las que llegan son que las presiones en los nudos son representados fehacientemente por el modelo reducido pero que no ocurre lo mismo con el cloro residual y la edad del agua, los cuales presentan diferencias considerables con la red primitiva. En última instancia, afirman que lo que debe predominar siempre es el objetivo para el cual se usará la red reducida y las particularidades que posea cada caso de estudio. Saldarriaga et al. (2009) llega a conclusiones similares al comparar la reducción con técnicas convencionales con su método basado en el criterio de resiliencia.

Sin duda una de los mayores desafíos a la hora de simplificar una red es lograr no perder representatividad en cuanto a análisis de calidad de agua, algo que no siempre se alcanza según Grayman y Rhee (2000). Bahadur et al. (2006) examinan la relación que existe entre el nivel de esqueletización de una RDA y los resultados obtenidos en cuanto a calidad del agua. Para ello, seleccionan un caso de estudio y le aplican distintos niveles de reducción utilizando dos técnicas: eliminación de ramales terminales y fusión de tuberías idénticas (exceptuando su longitud) en serie. Las escalas se definen en base al diámetro máximo susceptible de ser simplificado: a mayor diámetro admisible, mayor reducción de la red. Las demanda de los nudos intermedios son relocalizadas en los

nudos finales de la nueva tubería utilizando una distribución ponderada basada en el largo de las tuberías originales o en las demandas existentes en los nudos de las mismas. La influencia de la simplificación es evaluada a través de cuatro parámetros, cuyos resultados arrojan las siguientes conclusiones:

- **Velocidad:**
  - A mayor nivel de simplificación, mayor velocidad promedio del agua. Esto se justifica por la reducción en la longitud total de tuberías de la red.
- **Edad del agua:**
  - A mayor nivel de simplificación, menor edad del agua. Al igual que la velocidad, esto está relacionado con la reducción de tuberías de la red, principalmente los ramales terminales con nudos de demanda nula, que generan aumentos en el tiempo que permanece el agua en el sistema. Este fenómeno de reducción de la edad puede provocar la falsa sensación de que los modelos reducidos tienen mejor calidad del agua.
- **Demanda:**
  - Si bien la demanda total de la red se mantiene constante, a mayor nivel de simplificación mayor es la demanda relocalizada. Esto, evidentemente, influye en la velocidad y edad del agua en el sistema.
- **Densidad poblacional:**
  - En general esta se ve disminuida a medida que aumenta el nivel de simplificación de la red. La reducción es mucho más marcada en las primeras etapas de esqueletización, puesto que en ellas se eliminan los ramales terminales, cuyos nudos finales suelen ser concentradores de altos valores de demanda.

Un estudio similar al anterior es realizado por Hellbach et al. (2011), quienes investigan la influencia de distintas propiedades de las RDA en los niveles de simplificación. Para ello, analizan 300 redes aleatorias generadas automáticamente, a las cuales les aplican diferentes niveles de reducción utilizando la unión de tuberías en serie. Establecen que para que dos tuberías puedan unirse, estas deben tener igual diámetro, igual coeficiente de fricción y el nudo intermedio que las vincula no debe estar conectado a una tercera línea. Para comparar la bondad de los modelos reducidos, utilizan el índice de Nash-Sutcliffe (1970) y un criterio porcentual. El índice de Nash-Sutcliffe se calcula en base a los valores máximos de caudal y presión de líneas y nudos. El criterio porcentual se obtiene comparando todos los valores de caudal y presión, siendo aceptados cuando es menor a +/- 5%. Las conclusiones obtenidas para cada parámetro evaluado son las siguientes:

- **Velocidad:**
  - Índice Nash – Sutcliffe: los resultados obtenidos no permiten visualizar una relación directa entre el nivel de simplificación y la precisión en los valores de velocidad.
  - Relación nº nudos / nº líneas: se observa que, a nivel general, a mayor ratio aumenta la fidelidad de la red simplificada en cuando a valores de velocidad.
- **Presión:**
  - Los valores de presión poseen alto nivel de precisión independientemente del grado de simplificación, lo cual permite establecer que este no es un factor crítico. La exactitud en los resultados de presión se debe a la simulación con análisis estático.

- **Caudal:**
  - Índice Nash – Sutcliffe: en este caso es posible reconocer una influencia entre el porcentaje de nudos removidos y la precisión de los resultados de caudal: a menor porcentaje, mayor exactitud.
  - Criterio porcentual: no se pueden identificar tendencias claras entre las propiedades de la red original y los resultados de caudal obtenidos en la red simplificada.
- **Calidad del agua:**
  - Índice Nash – Sutcliffe: si bien se reconoce una leve tendencia a mayor exactitud en sistemas con baja demanda, se concluye que el nivel de esqueletización tiene baja influencia en la precisión de los valores de calidad de agua.
  - Criterio porcentual: se observa que la simplificación arroja buenos resultados para RDA con bajo número de tuberías y alta longitud promedio, marcando una clara tendencia en este aspecto.

Uno de los puntos más criticados de las redes simplificadas es su capacidad para representar fehacientemente los fenómenos transitorios. A excepción de las metodologías específicas de reducción basadas en transitorios, ningún procedimiento basado en régimen estacionario logra niveles de precisión admisibles. Jung et al. (2007) estudian los efectos que produce la simplificación, a través de las técnicas convencionales, en la representación de estos fenómenos. Puesto que el modelo original está construido a partir de datos GIS, Jung et al. ejecutan primero una depuración de elementos para subsanar la excesiva segmentación de tuberías. Luego, realizan la fusión de tuberías paralelas y tuberías en serie de iguales características (material, diámetro, etc.), calculando una tubería equivalente que respete la caída de altura piezométrica original. Finalmente, eliminan los ramales terminales de la red. Estas tres técnicas son ejecutadas de forma iterativa, hasta obtener la red simplificada final en la cual evalúan los efectos de los fenómenos transitorios. La conclusión a la que arriban es que las RDA simplificadas a partir de las técnicas convencionales no son aptas para representar fehacientemente los fenómenos transitorios a los cuales están sometidas. Los errores más comunes en los que se incurre están relacionados con el cálculo de los picos de presión, algo que puede provocar el diseño de protecciones deficientes.

Mohammed & Gad (2012) también estudian el comportamiento de RDA simplificadas frente a fenómenos transitorios de manera similar a Jung et al. (2007) con la diferencia de que además de hacer un modelo reducido hidráulicamente equivalente, construyen otro que considera también la calidad del agua. Para ello, el diámetro equivalente en tuberías en serie y paralelas es obtenido con la ecuación de Raczynski (2008) a partir de garantizar igual tiempo de viaje. La principal conclusiones a las que llegan son que a medida que aumenta el nivel de simplificación de la red, aumentan las diferencias con la red original en cuando a picos de presión. A su vez, destacan que en el modelo reducido hidráulicamente equivalente, la frecuencia de las ondas transitorias aumenta a medida que aumenta el grado de simplificación.

#### 2.2.4 Campo de estudio

La descripción de las publicaciones de simplificación más sobresalientes realizada en este capítulo permite obtener una clara idea del estado del arte de la materia. Como se ha mencionado, la necesidad de simplificar modelos matemáticos de redes de distribución de agua está presente en la mayoría de las aplicaciones profesionales y científicas, y seguirá aún más vigente en el futuro, puesto que cada vez es mayor la información de base disponible para construir estos sistemas computarizados.

El estudio del estado del arte ha permitido reconocer que, si bien existe una vasta cantidad de desarrollos científicos que abordan el tema de la esqueletización, la problemática está aún lejos de ser resuelta por completo. Por un lado, se observa que un gran número de metodologías de reducción son solo exitosas para casos muy particulares de redes o se aplican solo a ciertos elementos de las mismas, no ayudando a encontrar una solución de simplificación global. Por otra parte, la mayoría de los métodos denominados no convencionales que sí ejecutan un análisis en conjunto de todo el sistema, suelen estar fundamentados en algoritmos rígidos que restringen las posibilidades del usuario para adaptarlos según su conveniencia. Otro aspecto en general no considerado por los métodos existentes, es la evaluación continua de la simplificación que permita cuantificar en cada paso de reducción la precisión alcanzada. En la mayoría de los casos, esto se realiza una sola vez y al finalizar la tarea, comparando red original con red simplificada. Finalmente, cabe mencionar que los procedimientos descritos suelen descartar la información de la porción de red eliminada, quitando al usuario de la red simplificada la posibilidad de conocer las condiciones de presión mínima que debe tener para garantizar el servicio en la red original.

A partir de lo anterior, se observa que existe aún campo de estudio por explorar. La necesidad de desarrollar una metodología de simplificación práctica, que permita ser adaptable al objetivo para el cual se utilizará la red reducida, que cumpla con los estándares de precisión necesarios y que a su vez considere la información de la red original, está aún vigente. El presente trabajo pretende ser una solución a esta problemática.

### 2.2.5 Indicadores de eficiencia de modelos

Se ha hecho hasta aquí una revisión de las principales metodologías existentes para la obtención de modelos reducidos de RDA. Si bien cada una aplica un concepto hidráulico o matemático diferente, hay algo que todas tienen en común: la evaluación de resultados. Sea cual fuere la herramienta diseñada, para ser validada deben analizarse los valores que arroja y compararlos con los datos del modelo original.

A partir de lo anterior, resulta evidente pensar que para cualquier tipo de validación de resultados se debe primero elegir el tipo de análisis de errores que se ejecutará. Muchas veces, esta comparación resulta directa y no precisa de sofisticadas formulaciones. Sin embargo, cuando se trata de cotejar series de datos, es siempre recomendable valerse de herramientas estadísticas específicas que permitan elaborar una valoración más acertada.

A continuación se hace un breve repaso teórico de las formulaciones que se utilizan luego en el presente trabajo de investigación.

#### Índice de Nash – Sutcliffe NS

Tal vez uno de los indicadores de eficiencia más utilizados en la hidráulica e hidrología sea el índice de Nash-Sutcliffe (1970). Este índice, creado por los autores para evaluar parámetros hidrológicos en ríos, se define de la siguiente manera:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - s_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2} \quad (6)$$

Donde:

$NS$  = índice de Nash-Suttcliffe.

$o_i$  = i-ésimo valor observado.

$s_i$  = i-ésimo valor simulado por el modelo.

$\bar{o}$  = media de los valores observados.

$n$  = tamaño de la muestra.

En términos estadísticos, el numerador de la ecuación (6) se define como la suma de los cuadrados de los errores, siendo los errores la diferencia entre los valores observados y los valores simulados. Esta sumatoria mide la variación de los datos que no han sido explicados por el modelo. El denominador de la ecuación (6) es la suma de los cuadrados de los valores medidos respecto a la media de los mismos, es decir, refleja la variación total de los valores medidos respecto a la media (McCuen et al., 2006).

El NS varía entre  $-\infty$  y 1. Un valor de NS = 1 indica que el ajuste entre el modelo y los datos observados es exacto. Un valor de NS = 0 indica que la predicción del modelo es equivalente al valor medio de los valores observados. Un valor NS < 0 implica que el valor medio de los datos observados es mejor predictor que el propio modelo. A modo referencial, Molnar (2011) define la escala de interpretación mostrada en la Tabla 4

Tabla 4 - Interpretación de valores de NS (Molnar, 2011).

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

La popularidad del NS no implica que su utilización sea siempre acertada. Analizando la ecuación (6) se puede observar que mientras mayor es la desviación standard de los valores observados, mayor es el NS. Esto exige que indefectiblemente deban considerarse las características de la muestra al utilizar este índice como medida de eficiencia de un modelo. En su evaluación del NS, McCuen et al. (2006) concluyen que debido a la influencia que el tamaño de la muestra, los valores atípicos y los sesgos tienen sobre el valor del NS, este no debe ser utilizado como único indicador de eficiencia de un modelo. Jain y Sudheer (2008) llegan a la misma premisa.

#### Índice de Willmott d

Otro indicador de eficiencia comúnmente usado es el índice de Willmott (1984). Al desarrollar esta formulación, el autor busca aumentar la valoración de los valores bajos y disminuir la de los valores extremos, tal como ocurre con el NS.

La ecuación presentada por Willmott es la siguiente:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - s_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|s_i - \bar{o}| + |o_i - \bar{o}|)^2} \quad (7)$$

Al igual que el NS, el "d" varía entre  $-\infty$  y 1. Un valor de d = 1 indica que el ajuste entre el modelo y los datos observados es exacto.

### Error máximo relativo $E_{\max r}$

El error máximo relativo se define como la máxima diferencia entre el valor observado y el valor simulado, sobre el valor observado:

$$E_{\max r} = \max \left( \frac{|o_i - s_i|}{o_i} \right)_{i=1}^n \quad (8)$$

Valores bajos de  $E_{\max r}$  indican buena semejanza entre el modelo y los valores observados.

### Error cuadrático medio MSE

El error cuadrático medio (Fox, 1981) mide la media de los cuadrados de los errores, es decir, la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores observados y simulados, sobre el tamaño de la muestra. El MSE es siempre positivo y su proximidad a cero indica una buena similitud entre las series comparadas.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - s_i)^2}{n} \quad (9)$$

Valores bajos de MSE indican buena semejanza entre el modelo y los valores observados.

### Raíz del error cuadrático medio RMSE

A partir del MSE, se calcula el RMSE (Fox, 1981) que representa el error de la raíz cuadrada de la media, o la desviación de la raíz cuadrada media, la cual posee igual unidad que los valores medidos:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - s_i)^2}{n}} \quad (10)$$

Valores bajos de RMSE indican buena semejanza entre el modelo y los valores observados.

### Eficacia del método EF

Este indicador está basado en la prueba de Kruskal-Wallis (1952), la cual constituye una alternativa no paramétrica al análisis de varianza tradicional. El EF toma como factor independiente cualitativo a MSE.

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2 - \sum_{i=1}^n (o_i - s_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2} \quad (11)$$

Al igual que el NS, el EF varía entre  $-\infty$  y 1. Un valor de  $d = 1$  indica que el ajuste entre el modelo y los datos observados es exacto.

### Coefficiente de correlación de Pearson $\rho_{x,y}$

Los coeficientes de correlación son expresiones numéricas que indican el grado de relación existente entre dos variables cuantitativas. Los valores que pueden adoptar varían entre -1 y 1. Estos valores extremos representan correlaciones perfectas, tanto positivas como negativas. Un valor de coeficiente nulo señala la inexistencia de relación entre las variables analizadas (Suárez Ibujes, 2011).

El coeficiente de correlación de Pearson (Bravais, 1844) se define matemáticamente de la siguiente forma:

$$\rho_{x,y} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \rightarrow \begin{cases} \sigma_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o}) \cdot (s_i - \bar{s})}{n} \\ \sigma_x = \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2}{n} \\ \sigma_y = \frac{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2}{n} \end{cases} \quad (12)$$

### Coeficiente de redeterminación $R^2$

El coeficiente de redeterminación mide la capacidad explicativa que tiene el modelo, ya que indica cual es la proporción de la variación total en la variable dependiente. La ecuación puede plantearse a partir del coeficiente de Pearson de la siguiente manera:

$$R^2 = \rho_{x,y}^2 = \frac{\sigma_{x,y}^2}{\sigma_x^2 \sigma_y^2} \quad (13)$$

Si  $R^2 = 0$ , significa que la variable simulada tiene nula capacidad para representar los valores observados. Un valor  $R^2 = 1$  simboliza que la representatividad del modelo es completa.

### Índice de desempeño C

El índice de desempeño fue desarrollado por Camargo y Sentelhas (1997) como el producto entre el índice de Willmott (1984) y el coeficiente de correlación de Pearson (Bravais, 1844).

$$C = d \cdot R = d \cdot \rho_{x,y} \quad (14)$$

Donde:

$d$  = Índice de Willmott

$\rho_{x,y}$  = coeficiente de correlación de Pearson.

Los autores proponen la siguiente interpretación de los resultados:

Tabla 5 - interpretación del índice de desempeño (Camargo & Sentelhas, 1997).

C	Rendimiento
> 0.85	Excelente
0.76-0.85	Muy bueno
0.66-0.75	Bueno
0.61-0.65	Medio
0.51-0.60	Tolerable
0.41-0.50	Malo
$\leq 0.40$	Pésimo

A modo de conclusión, cabe mencionar que la descripción de los indicadores de eficiencia realizada en este apartado sirve de base teórica para la definición de la forma en la que la metodología propuesta evalúa la exactitud de la simplificación. Como se explica en el apartado siguiente, un algoritmo de validación continua es diseñado para ejecutar esta tarea.

## 3. METODOLOGÍA PARA LA SIMPLIFICACIÓN DE MODELOS DE RDA REALIZADOS CON EPANET

### 3.1 Introducción

Como se mencionó en su comienzo, el objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología de simplificación de modelos matemáticos de RDA construidos con el software EPANET, del cual ya se han explicado sus características operativas. Para alcanzar esta meta, el primer paso consiste en definir qué tipo de metodología se desea aplicar. Y para ello, se debe saber previamente qué clase de modelo reducido se pretende obtener.

Tal como fue demostrado en la revisión del estado del arte, la simplificación de una red no es algo estandarizado sino que debe adaptarse en base a las características de la red y necesidades del modelador u operador de la misma. Por lo tanto, resulta interesante desarrollar una metodología práctica, versátil y fiable que permita obtener resultados a la medida del usuario. Esta es la premisa que se persigue al realizar este trabajo y en base a la cual se ha diseñado el procedimiento que se explica en los siguientes apartados.

Con el objetivo de concentrar esfuerzos y respetar las etapas ineludibles que tiene todo desarrollo de investigación, el método se ha diseñado para realizar simplificaciones teniendo en cuenta análisis hidráulicos en las RDA. La aplicación para análisis de calidad de agua queda planteada como desarrollo futuro al final del documento.

### 3.2 Descripción de la metodología propuesta

#### 3.2.1 Datos de partida

El punto de partida para realizar una simplificación es el modelo matemático de la red de distribución de agua realizado, en el caso particular de este trabajo, con el software EPANET. Respecto a los componentes físicos, la RDA está dotada como mínimo de tuberías unidas mediante nudos, sumadas a una fuente de agua la cual puede ser un depósito o un embalse. El modelo puede contar también con elementos de operación y maniobra, tales como válvulas de regulación, reductoras o sostenedoras de presión, de rotura de carga, entre otras. Por último, si el suministro no fuera realizado solo por gravedad, la red incluirá además el correspondiente sistema de bombeo.

Cada uno de los componentes de la red debe tener definidas sus dimensiones físicas y/o topológicas, a saber:

- Nudos: elevación o cota.
- Tuberías: longitud, diámetro y coeficiente de rugosidad.
- Válvulas: diámetro y tipo.
- Bombas: curva característica.
- Depósito: cota, diámetro, curva de volumen, nivel máximo y mínimo.
- Embalse: altura total.

El modelo debe contar, por otro lado, con las condiciones operacionales de la red. Estas pautas son las que hacen que el sistema hidráulico se comporte de una u otra manera. En general son:

- Valor de demandas en nudos.
- Patrones de demanda.
- Estado de tuberías: estado inicial y controles de estado.
- Válvulas: valor de consigna, estado inicial y controles de estado.
- Bombas: estado inicial y controles de estado.
- Depósito: nivel inicial.
- Embalse: patrón de altura.

El conjunto de condiciones operacionales conforma lo que se define como escenario. De esta manera, una misma red topológica puede ser sometida a distintos escenarios, que arrojarán diferentes resultados hidráulicos. Por lo tanto, aunque la topología entre dos redes sea igual si sus escenarios son diferentes, las redes serán diferentes en términos hidráulicos.

El concepto anterior es de relevada importancia puesto que, al momento de simplificar una RDA, se estará simplificando su topología basado en un escenario particular. Evidentemente, escenarios distintos arrojarán simplificaciones distintas. En ciertas ocasiones, la robustez de una red simplificada suele valorarse en base a su capacidad de representar fehacientemente un escenario distinto al cual fue considerado durante su esqueletización.

### 3.2.2 Algoritmo de simplificación

Para que una metodología sea práctica debe ser sencilla de comprender y fácil de aplicar. Esto quiere decir que cualquier profesional que trabaje con RDA pueda implementarla e interpretar la información de salida sin mayores complicaciones. Se ha visto que existen procedimientos de reducción que obtienen resultados de gran precisión pero que presentan la desventaja de poseer una alta complejidad en sus bases teóricas y operacionales. Muchos de ellos son una especie de caja negra que devuelve una red reducida pero que no permite visualizar el proceso realizado. Esto en cierta manera limita su aplicabilidad por ser difíciles de comprender para los usuarios con menor experiencia en la materia.

En ese sentido, las técnicas convencionales mencionadas en el apartado 2.2.2.1 y descritas por (Cesario, 1995; Walski et al., 2003) se convierten en candidatas predilectas para ser incluidas en métodos de esqueletización prácticos. La naturaleza topológica que poseen hace que su interpretación física sea directa y por tanto, muy comprensible. Es por esta razón que han sido seleccionadas como herramientas base de la metodología desarrollada en el presente trabajo, a las cuales se les suman otras incluidas por el autor.

En relación a los elementos susceptibles de ser eliminados, el método solo considera nudos y tuberías. El resto de componentes de las RDA (bombas, depósitos, etc.) suele tener gran influencia en el funcionamiento de la misma y por lo tanto, a priori, su remoción no es considerada. No obstante, si el usuario lo deseara, podría incluirlos en el proceso, tal como se explicará luego en el documento.

Puesto que la metodología está orientada a ser aplicada en RDA tanto simples como complejas, el proceso de esqueletización se plantea de forma secuencial e iterativa. El mismo está compuesto por dos etapas independientes que, a su vez, contienen distintas técnicas de reducción:

- **Etapas n°1**
  - Unión de tuberías paralelas.
  - Eliminación de nudos terminales.

- Eliminación de nudos intermedios.
- **Etapa n°2**
  - Eliminación por bloques terminales.
  - Unión de nudos cercanos.

La descripción detallada de cada uno de las técnicas de simplificación de las que se compone cada etapa se presenta en el apartado 3.3.

De forma esquemática se presenta en la Figura 15 el diagrama de flujo del método propuesto. Como se puede apreciar, se trata de un procedimiento iterativo compuesto por etapas que deben ejecutarse sucesiva y repetidamente hasta lograr el máximo grado de reducción posible. Este objetivo se habrá alcanzado cuando, entre una ejecución y la siguiente, no haya variación en el número total de nudos ( $\Delta N = 0$ ), lo cual indicará que ya no hay nada más por simplificar.

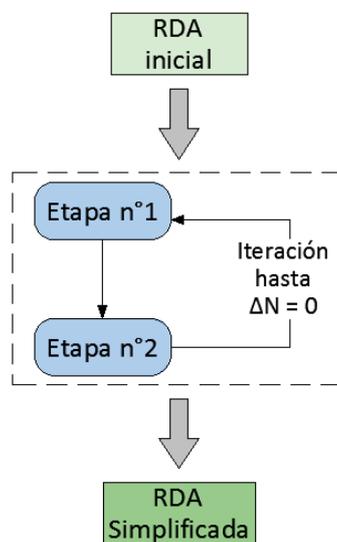


Figura 15 - Diagrama de flujo general del método propuesto

### 3.2.2.1 Descripción Etapa n°1 del algoritmo

Dentro de la Etapa n°1 se aplican las técnicas de unión de tuberías paralelas (a), eliminación de nudos terminales (b) y eliminación de nudos intermedios (c) ya presentadas en el apartado 2.2.2.1 (ver Figura 16).

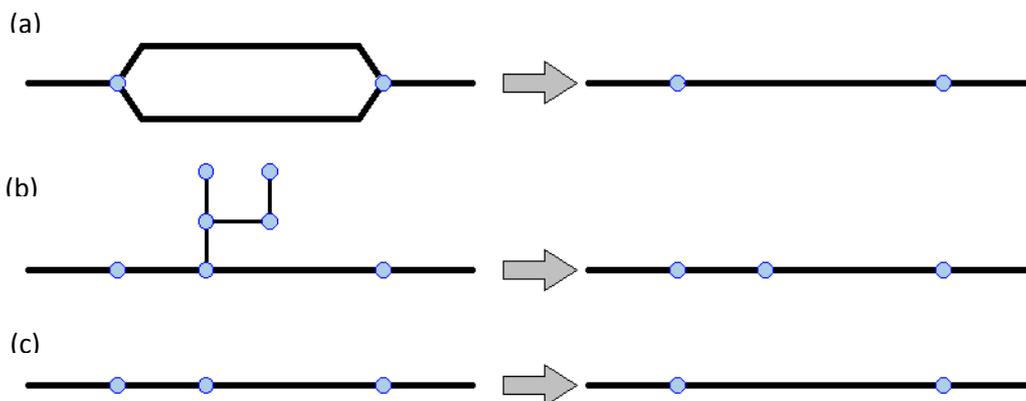


Figura 16 – Técnicas de simplificación de la Etapa n°1

Analizando el estado del arte descrito en apartados anteriores, se observa que la mayoría de los métodos de simplificación elemento a elemento definen una secuencia rígida de pasos consecutivos a ejecutar. El problema de aplicar este procedimiento es que pueden quedar elementos sin simplificar al terminar el proceso. Con el objetivo de explicar este concepto, se presenta la red de ejemplo mostrada a la izquierda de la Figura 17. Para que los nudos terminales sean simplificables, se debe primero realizar la unión de tuberías paralelas. Si este orden no se respetara, el nivel de reducción que se alcanzaría no sería el máximo. El resultado de unir las tuberías paralelas es el mostrado a la derecha en la Figura 17.

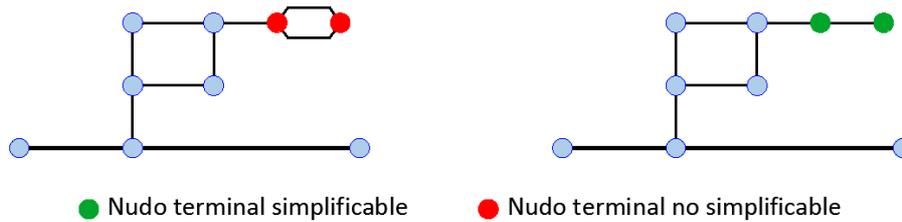


Figura 17 - Ejemplo de influencia de orden de simplificación.

Continuando con el ejemplo anterior, resulta lógico definir como siguiente paso la eliminación de los ramales terminales de la red, para que se genere mayor cantidad de nudos intermedios simplificables, tal como expone la Figura 18. La red resultante es la graficada a la derecha en la misma figura.

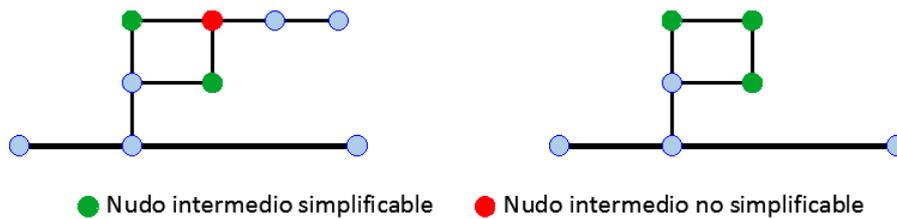


Figura 18 - Ejemplo de influencia de orden de simplificación.

Finalmente, se realiza la simplificación de nudos intermedios. Como la reducción se ejecuta elemento a elemento, luego de eliminar dos de los nudos intermedios, el tercero deja de ser un caso de nudos intermedios y pasa a ser un caso de tuberías paralelas, tal como muestra la Figura 19.

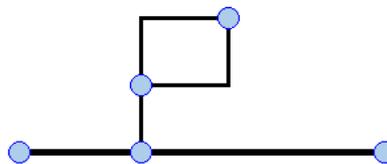


Figura 19 - Ejemplo de influencia de orden de simplificación.

Con el ejemplo anterior se demuestra que si el algoritmo de simplificación plantea una secuencia como la descrita (Paralelas – Terminales – Intermedios), no es posible alcanzar el nivel máximo de reducción de la red. Esto se observa en la Figura 19, en la cual han quedado un par de tuberías paralelas y un par de nudos terminales por eliminar. Por lo tanto, para resolver esta cuestión y evitar que la secuencia de ejecución influya sobre el resultado final de la simplificación, se define que la Etapa n°1 se lleva a cabo de forma iterativa. De esta manera, luego de realizar una vez las operaciones de unión de paralelas, y eliminación de nudos terminales e intermedios, estas se ejecutan nuevamente tantas veces haga falta, hasta lograr la simplificación total mostrada en la Figura 20

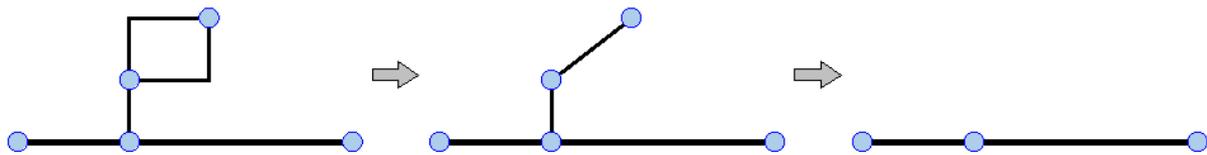


Figura 20 - Ejemplo de simplificación con algoritmo iterativo.

Basado en lo anterior, el algoritmo de simplificación resultante para la Etapa n°1 se muestra en la Figura 21. Como ya fue mencionado, esta secuencia se ejecuta hasta que se hayan eliminado todos los nodos posibles, lo cual se mide a través de la variación del total de nodos entre cada vuelta iterativa. El resultado obtenido de esta etapa es una versión simplificada de la RDA, denominada RDA – S1.

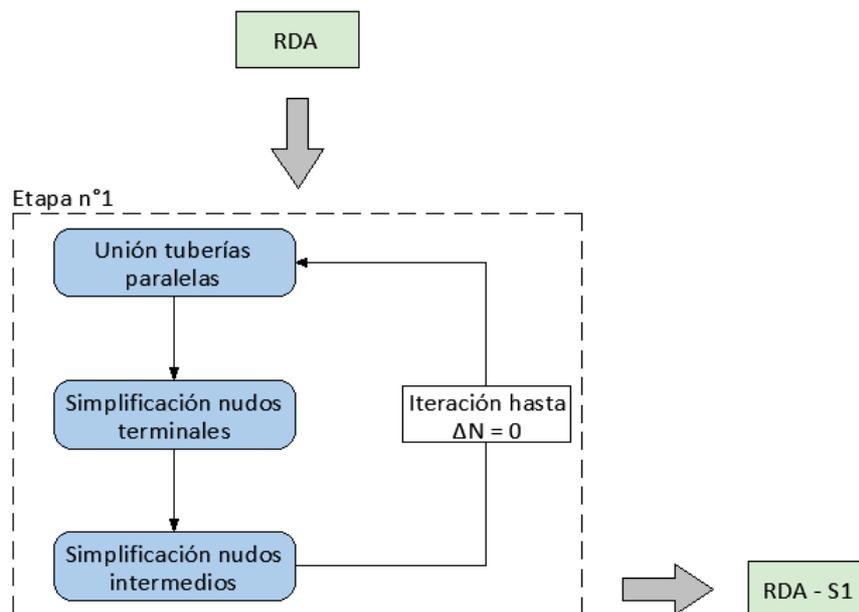


Figura 21 - Algoritmo de simplificación de la Etapa n°1

Para explicar con mayor detalle el funcionamiento del algoritmo, se deben analizar los procesos intermedios de búsqueda de candidatos. Se denomina “Candidato” a aquellos nodos y tuberías susceptibles de ser eliminados. Para realizar esta clasificación, se evalúa el cumplimiento de ciertas características físicas y topológicas de cada elemento de la red, tales como índice de conectividad, diámetro, rugosidad, entre otras. Si el nudo o tubería analizada cumple con los requisitos pre establecidos por el usuario, se le asigna la condición de candidato y, por tanto, se incluye dentro de los procesos de reducción. La descripción en detalle de estos parámetros de simplificación se realiza en el apartado 3.2.4.

Los procesos de búsqueda de candidatos se realizan justo antes de la aplicación de cada técnica de esqueletización. Dada una RDA y definidos los parámetros de simplificación unió (explicados en el apartado 3.2.4), se la analiza primero buscando tuberías paralelas que puedan unirse y, en caso de existir, se ejecuta la unión de todas ellas. Esta unión se realiza de a una tubería por vez, hasta haberlas unido a todas. A continuación, se evalúa la red en búsqueda de nodos terminales susceptibles de ser eliminados y, en caso de existir, se realiza su simplificación también avanzando de uno en uno, hasta quitarlos a todos. Finalmente, se localizan aquellos nodos intermedios que puedan ser removidos de la red, los cuales son posteriormente quitados, igualmente, de a uno por vez. Esta etapa n°1 se realiza

de forma iterativa, tal como muestra la Figura 22, hasta que ya no queden más candidatos de paralelas, terminales o intermedios por borrar.

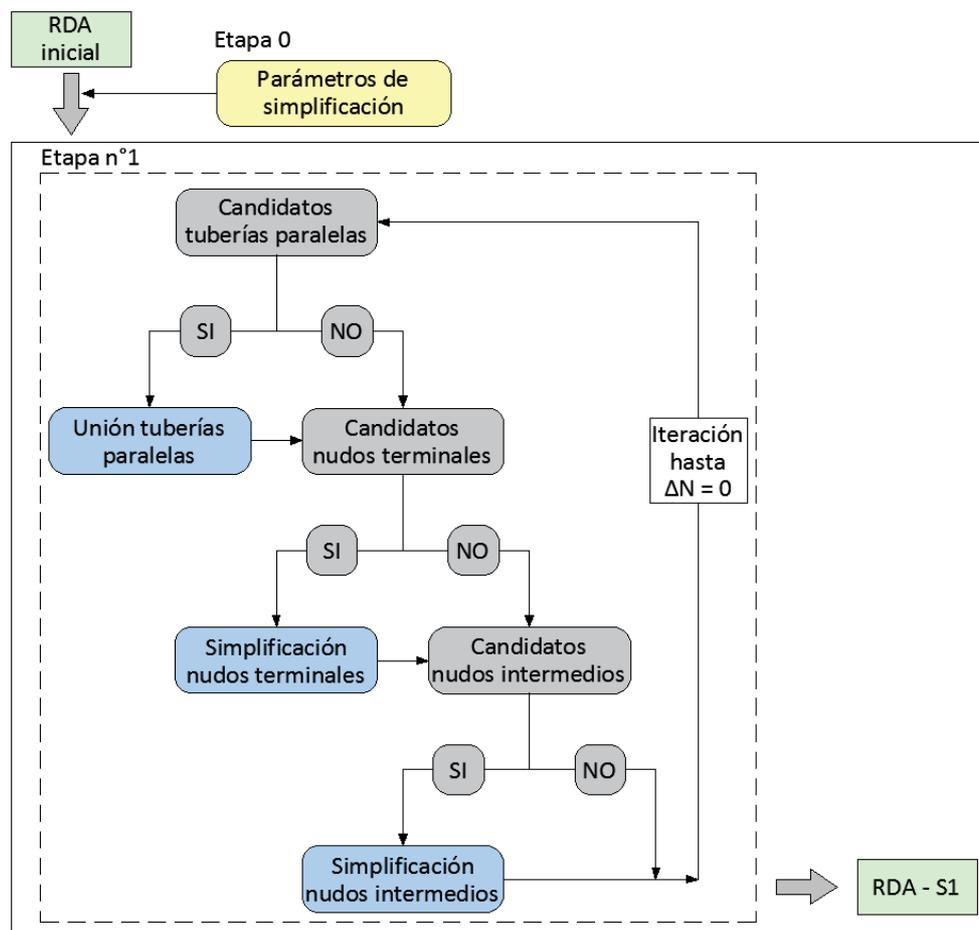


Figura 22 - Algoritmo de simplificación de etapa n°1 con subprocesos.

### 3.2.2.2 Descripción Etapa n°2 del algoritmo

Como grafica la Figura 15, la Etapa n°2 del algoritmo se ejecuta luego de haber finalizado el proceso iterativo de la Etapa n°1. Por lo tanto, la RDA de entrada a esta fase del proceso de esqueletización (RDA – S1) es una red reducida que no posee tuberías paralelas, nodos terminales ni nodos intermedios simplificables de acuerdo a los parámetros de reducción establecidos por el usuario.

Las dos técnicas de simplificación que componen esta segunda etapa, y que serán explicadas a continuación, son la remoción de bloques terminales y la unión de nodos cercanos.

La **eliminación de bloques terminales** es una herramienta que surge a partir de la observación de las redes simplificadas arrojadas por la Etapa n°1. En ellas se aprecia que existen comúnmente conjuntos de nodos y tuberías que forman mallas cerradas no simplificables con las técnicas de la Etapa n°1 pero que, por su vinculación a la red principal mediante un único nudo, son en la práctica susceptibles de eliminarse como ramales terminales. Se entiende como red principal a la sub red de tuberías de mayor diámetro que configuran el núcleo estructural de la RDA. De ella se desprenden las tuberías secundarias o subsidiarias, las cuales poseen en general diámetros de menor magnitud.

La Figura 23 explica lo comentado anteriormente. El bloque A ha llegado a un punto en el cual ya no es factible incrementar su reducción con las operaciones de la etapa n°1. Sin embargo, puesto que se vincula a la red principal solo mediante el nudo N1, se le pueda dar tratamiento como ramal terminal conjunto.

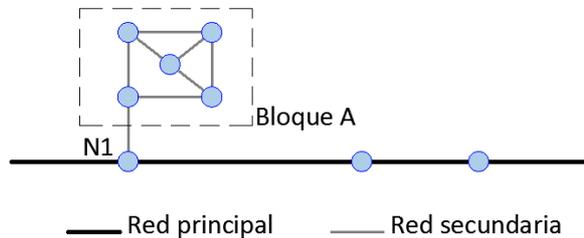


Figura 23 - Ejemplo de bloque terminal.

Considerando lo antes descrito, la RDA – S1 es analizada en búsqueda de bloques terminales, los cuales son eliminados uno a uno. La red resultante de este proceso se denomina RDA – S2a. La Figura 24 presenta el diagrama de flujo de esta operación perteneciente a la Etapa n°2.

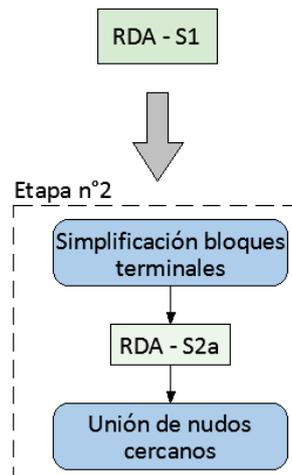


Figura 24 - Diagrama de flujo Etapa n°2 parcial.

Al igual que ocurre al simplificar nudos terminales, en este caso también deben tomarse ciertas precauciones para evitar perder información correspondiente al bloque eliminado. Es necesario considerar no solo los caudales de demanda requeridos en el mismo sino también los niveles de presión que garanticen el suministro en los nudos del conjunto borrado. En el apartado 3.3.4 se presenta el detalle de este cálculo.

La última técnica de simplificación que se aplica en la metodología propuesta es la de **unión de nudos cercanos**. Se definen como nudos cercanos aquellos que se encuentran a distancias topológicas menores a cierto valor predefinido por el usuario. Esta longitud varía de acuerdo a la particularidad de cada red y al criterio de quien aplica el método.

Por encontrarse relativamente cerca, es de esperar que los nudos tengan alturas piezométricas similares. Esto habilita a que sea posible reemplazarlos por un único nudo y eliminar las tuberías de corta distancia que los vinculan. La Figura 25 muestra un típico caso de aplicación de esta técnica.

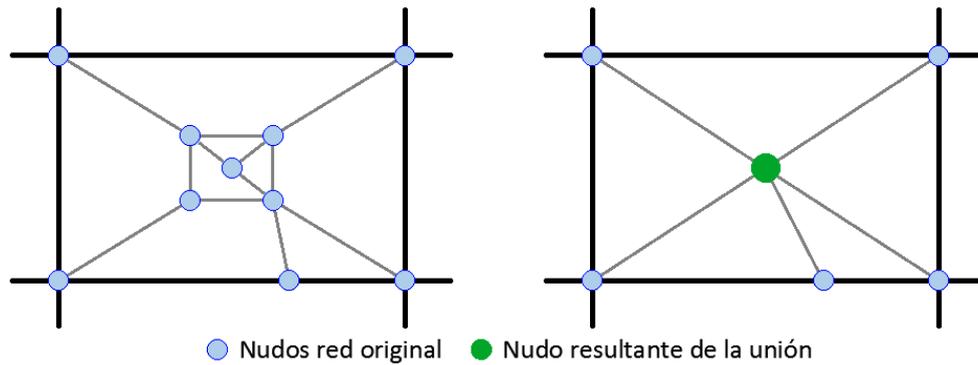


Figura 25 - Ejemplo de simplificación por unión de nodos cercanos.

Esta técnica resulta particularmente útil en redes secundarias malladas que no son susceptibles de ser eliminadas como bloques terminales por estar conectadas a la red principal por más de un nudo. Tal como ocurre en la eliminación de bloques, para que esta unión de nodos cercanos no genere un gran impacto en el resto de la red simplificada deben tomarse ciertos resguardos en cuanto a las demandas base y alturas piezométricas de consigna de las conexiones unidas. El detalle de este cálculo es presentado en el apartado 3.3.5.

Luego de realizar esta unión de nodos cercanos, se concluye la Etapa n°2 y por tanto finaliza el primer ciclo del proceso de reducción. El resultado es la RDA – S2. Como se ha explicado anteriormente al definir la secuencia de operaciones de la Etapa n°1, es muy probable que la RDA – S2 contenga nuevos elementos (tuberías paralelas, nodos intermedios, etc.) susceptibles de ser eliminados. Por lo tanto, se debe comenzar el procedimiento nuevamente y ejecutarse de forma iterativa hasta que se haya alcanzado la máxima reducción posible. Esto se controla mediante la variación de la cantidad de nodos entre ciclos sucesivos ( $\Delta N = 0$ ). La Figura 26 de la página siguiente esquematiza lo mencionado.

Se ha presentado hasta aquí el algoritmo de simplificación con el que opera la metodología planteada. Tal como ha sido explicado, el mismo está compuesto por dos etapas consecutivas que se ejecutan de forma iterativa hasta haber eliminado todo lo susceptible de ser simplificado con las operaciones que las conforman y siguiendo los parámetros definidos por el usuario.

A modo de conclusión de este apartado, cabe destacar que con este procedimiento se cumple el objetivo de desarrollar un proceso práctico y de fácil aplicación por su directa interpretación física.

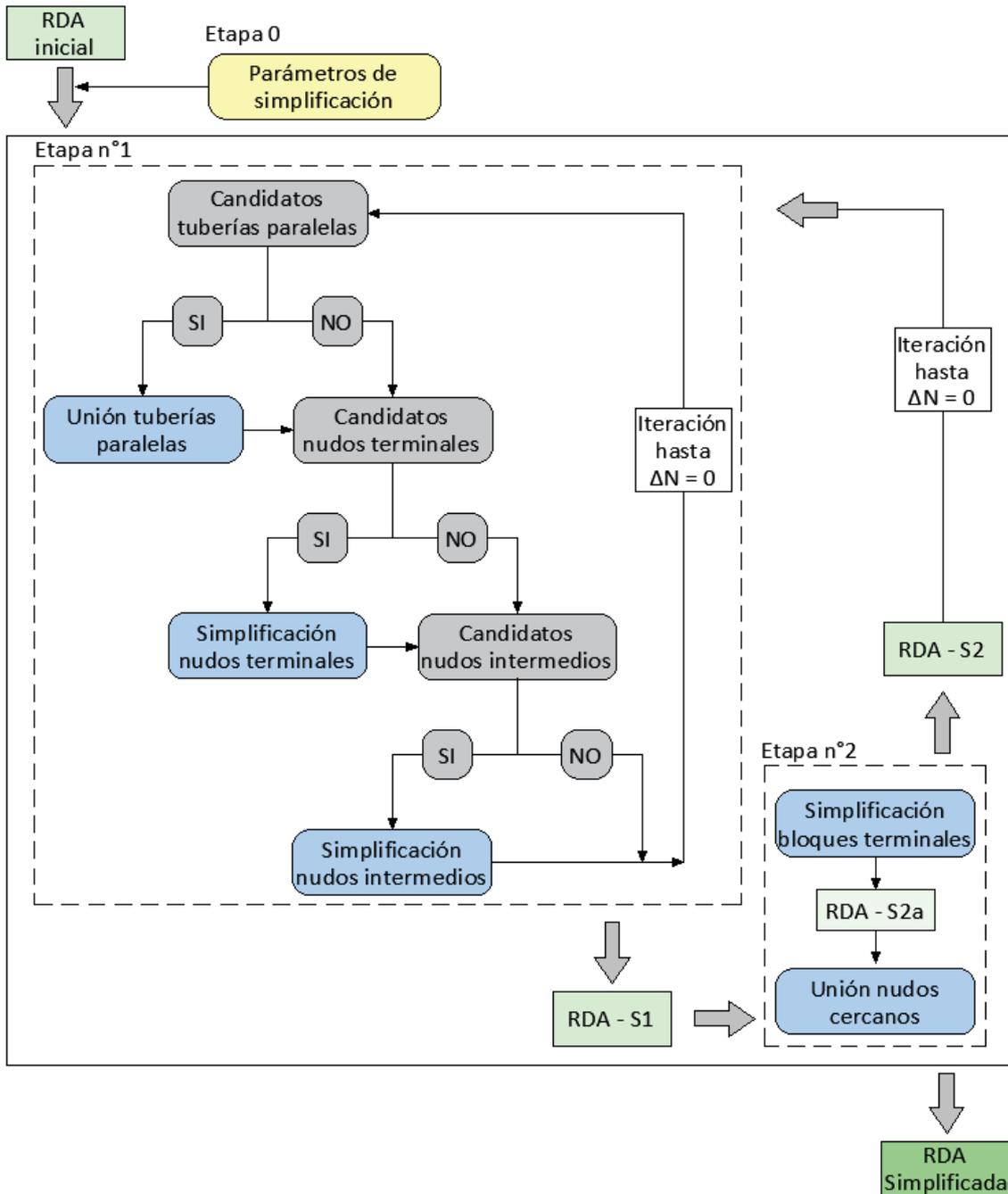


Figura 26 - Diagrama de flujo del algoritmo de simplificación.

### 3.2.3 Algoritmo de validación de la simplificación

Todo método científico precisa ser evaluado para confirmar su validez, aunque esto no siempre se realice en la esqueletización. Duzinkiewicz y Cimiski (2006) resaltan que las técnicas de simplificación convencionales propuestas por la USEPA (U. S. Environmental Protection Agency, 2005) y por Walski et al. (2003) contienen una desventaja al no presentar un procedimiento formal que permita valorar los resultados obtenidos. La metodología de simplificación propuesta en este trabajo busca subsanar esa falencia implementando un sistema de validación continuo a lo largo de todo el proceso de reducción de la red.

Al diseñar la forma en la cual se mide la bondad de ajuste del procedimiento, se debe definir qué variable o variables se medirán, en donde se medirán, cuando se medirán y como se determinará su nivel de validez. Se propone un procedimiento de **evaluación continua** aplicado en cada paso del proceso de simplificación. El método consiste en comparar, mediante una valoración dual, la bondad de ajuste entre la red simplificada y la red original. Esto se realiza a través de la medición de los valores que adoptan ciertas variables de comprobación en elementos de control predefinidos. Si el ajuste supera los estándares de calidad mínimos prefijados, la simplificación es confirmada y la nueva red generada pasa a ser oficial. Si no, la operación es cancelada y se retorna a la red oficial inmediatamente anterior a la simplificación efectuada.

La Figura 27 esquematiza de forma genérica el sistema de validación propuesto. Como se puede apreciar, la evaluación es continua y aplicada a la simplificación de todos los elementos de la red. Su aprobación es requisito fundamental para aceptar la operación de reducción ejecutada.

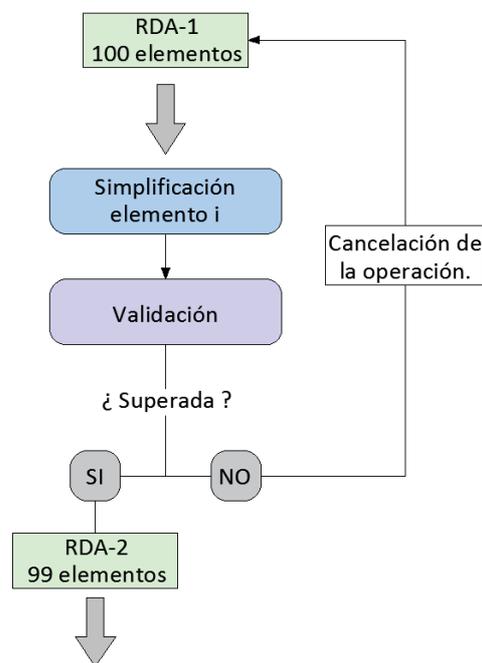


Figura 27 - Esquema del sistema de validación propuesto.

Presentado el sistema de validación, se explica en los párrafos siguientes los componentes del mismo. Siendo que se trata de una metodología de simplificación orientada al análisis hidráulico, resulta lógico establecer las presiones en los nudos y los caudales en las líneas como variables de comprobación de la eficiencia de la simplificación. Esto permite efectuar una valoración directa de la hidráulica de ambos modelos (original y simplificado) y por tanto constituye una óptima forma de evaluación, que permite incluso ser realizada a priori de manera visual con la ayuda de un gráfico, tal como muestra la Figura 28.

Para definir en qué componentes de la red se realiza la comparación, se utiliza lo que se denomina como **elementos de control**. Los elementos de control son nudos y líneas de la red convenientemente seleccionados por el usuario de la metodología. Para poder servir de comprobación, es requisito fundamental que estos estén presentes tanto en la red original como en la red simplificada. De esta manera, son comparados los valores de presión y caudal en estos elementos antes y después de cada operación de simplificación.

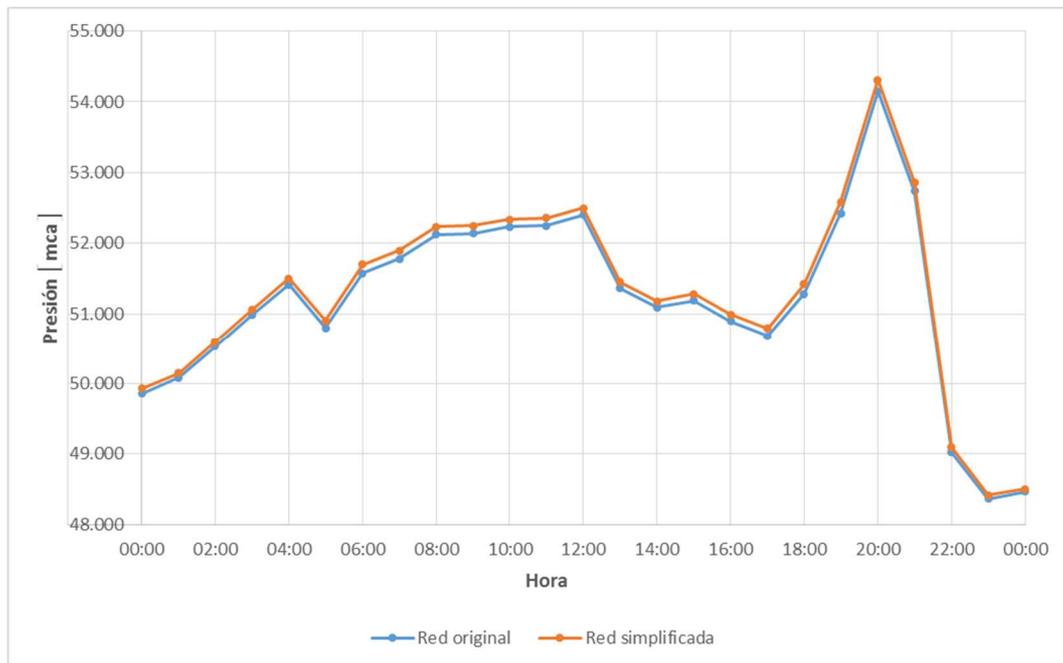


Figura 28 - Ejemplo de curva de evolución de presión de un nudo en red original y red simplificada.

Lo importante de esta metodología, que aumenta considerablemente su versatilidad, es que tanto la cantidad como la localización de los elementos de control son definidas por el usuario. Esto da opción a realizar su selección convenientemente en base al objetivo buscado con la simplificación. A modo de ejemplo se presenta la red mostrada en Figura 29. Los nudos y tuberías en rojo son una alternativa de elementos de control que el usuario elegiría si deseara hacer una reducción de la RDA procurando que el comportamiento de la red simplificada sea similar a la red original a nivel general.

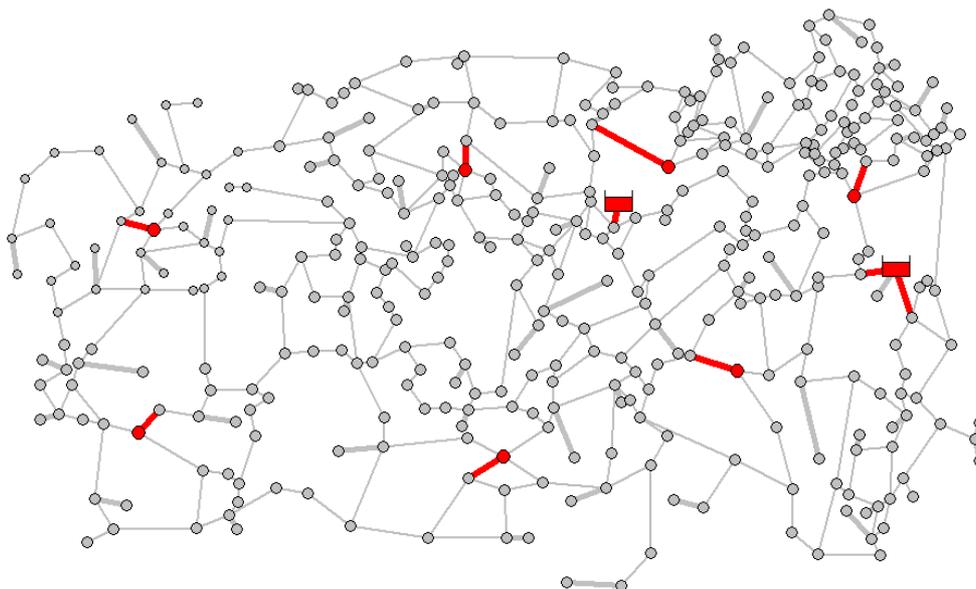


Figura 29 - Elementos de control para un nivel de ajuste general del modelo reducido.

Si en cambio, por alguna razón fuera necesario obtener mayor precisión en algún sector particular de la RDA (como por ejemplo el sector D de la Figura 30), el usuario podría determinar en dicha zona un mayor número de elementos de control. De esta forma, estaría garantizando que el comportamiento de la red simplificada en ese sector se ajustara con mayor precisión a la red original.

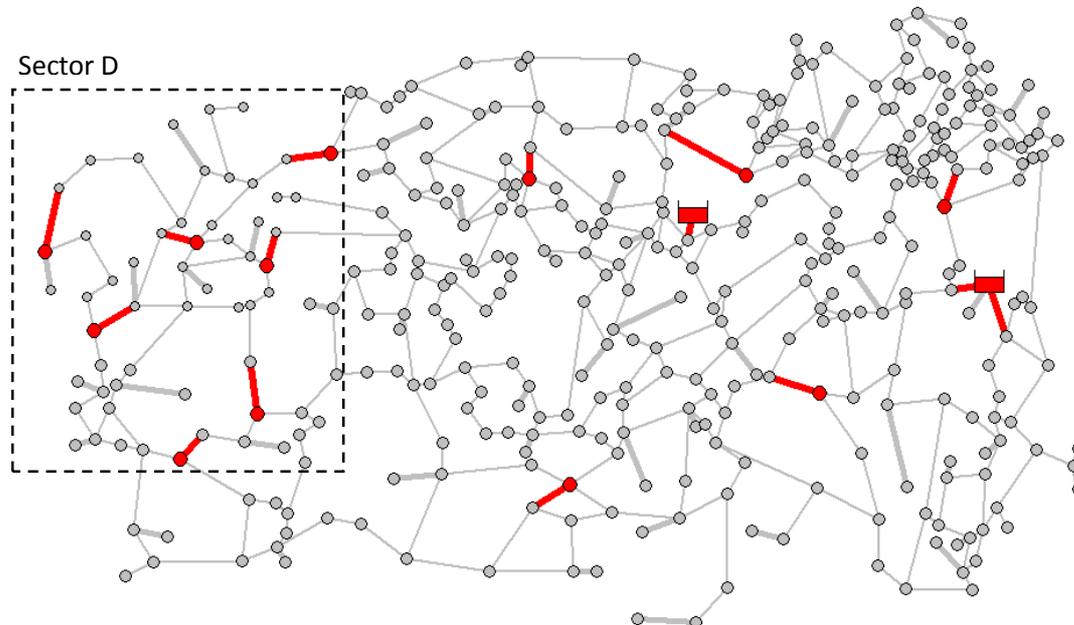


Figura 30 - Elementos de control para un nivel de ajuste sectorizado del modelo reducido.

Definido el concepto de elemento de control, se presenta a continuación la forma en la que se realiza en la práctica la validación. La valoración del ajuste entre los resultados de presión y caudal de la red original y la red simplificada se realiza mediante una **evaluación dual** utilizando un indicador de eficiencia de ajuste de series de datos y un criterio porcentual. De esta manera, se evita incurrir en errores de interpretación de resultados tales como los comentados por McCuen et al. (2006) y Jain y Sudheer (2008).

Se predefinen las siguientes alternativas de indicadores de eficiencia de series, aunque la metodología admite el uso de cualquier otra que cumpla una función similar:

1. Índice de Nash – Sutcliffe NS
2. Índice de Willmott d
3. Error cuadrático medio MSE
4. Raíz del error cuadrático medio RMSE
5. Eficacia del método EF
6. Coeficiente de correlación de Pearson  $\rho_{(x,y)}$
7. Coeficiente de redeterminación R2
8. Índice de desempeño C

La naturaleza y formulación de estos indicadores ha sido presentada en el apartado 2.2.5. El usuario de la metodología tiene la posibilidad de elegir, en base a su conocimiento y experiencia previa, el o los indicadores a utilizar en el proceso de validación y los valores mínimos admisibles de los mismos que determinarán si una simplificación es aprobada o no. Cabe destacar que, al igual que con los elementos de control, esta opción incrementa la versatilidad de la propuesta.

El otro componente de evaluación es el criterio porcentual. La inclusión de este indicador tiene como finalidad controlar la validez del o los indicadores de eficiencia implementados. El criterio porcentual se calcula en base a comparación directa entre valores de la red original y la red simplificada, con lo cual, no existe ninguna interferencia en el cálculo que pueda generar una mala interpretación de los resultados.

Se propone utilizar como criterio porcentual el error máximo relativo. Tal como fue descrito previamente, este se define como la máxima diferencia entre el valor observado y el valor simulado, sobre el valor observado (ecuación (15)). Al igual que con el indicador de eficiencia, el usuario del método tiene la potestad de definir el valor de error máximo relativo admisible.

$$E_{\max r} = \max \left( \frac{|o_i - s_i|}{o_i} \right)_{i=1}^n \quad (15)$$

Donde:

$o_i$  = i-ésimo valor observado.

$s_i$  = i-ésimo valor simulado por el modelo.

$n$  = tamaño de la muestra.

El usuario de la metodología debe definir los valores mínimos admisibles de los indicadores de ajuste y los valores máximos admisibles del criterio porcentual. Como se explica en el apartado 3.2.4, estos umbrales se determinan para presiones y caudales de forma independiente, lo cual incrementa aún más la adaptabilidad del método propuesto.

Tanto para el cálculo del indicador de ajuste de serie como para el criterio porcentual, se toman como base los valores de los nudos y líneas de control de la red original. De esta forma se evita incurrir en desviaciones producto del error acumulado que surgiría de comparar entre redes simplificadas sucesivas. Los valores mencionados de la red original se obtienen a través de una simulación hidráulica inicial.

Para poder realizar una validación continua, es necesario ejecutar simulaciones hidráulicas en cada operación de simplificación. De ellas, se recuperan los valores de presión y caudal de los elementos de control y se cotejan con los iniciales de referencia (obtenidos en la simulación hidráulica inicial) mediante el cálculo de los indicadores de ajuste y criterio porcentual. La comparación se realiza a escala horaria, es decir, se comparan para cada hora los valores de presión y caudal que tienen los elementos de control en ambas redes (original y simplificada).

De esta evaluación dual se obtienen los valores mínimos que adoptan los indicadores de eficiencia (por ejemplo para Nash-Sutcliffe = 0.70) y los valores máximos de errores relativos (por ejemplo  $E_{\max r}$  = 30%). Para determinar si estos son admisibles, se comparan con los umbrales límite predefinidos por el usuario. Si dichos umbrales no son superados, la simplificación se da por validada y la nueva red, ya sin el elemento eliminado, pasa a ser la oficial. En contrapartida, si alguno de los umbrales es sobrepasado (por ejemplo debido a que la simplificación de un elemento genera un mínimo NS = 0.68 o un  $E_{\max r}$  = 35 %), la simplificación es cancelada y se vuelve hacia atrás reincorporando el elemento eliminado (líneas rojas en Figura 31). En ambos casos, se continua luego con el siguiente elemento candidato, hasta haberlos evaluado a todos.

La Figura 31 grafica el diagrama de flujo comentado. Como se puede apreciar, el algoritmo de validación queda completamente integrado al algoritmo de simplificación, configurando así la

evaluación continua mencionada. Es por esta razón que los elementos candidatos son eliminados uno a uno y no todos al mismo tiempo, para poder valorar la influencia que tiene la remoción de cada uno de ellos en el funcionamiento global de la red. Esta forma de control constante del efecto de la simplificación es la que brinda fiabilidad al método.

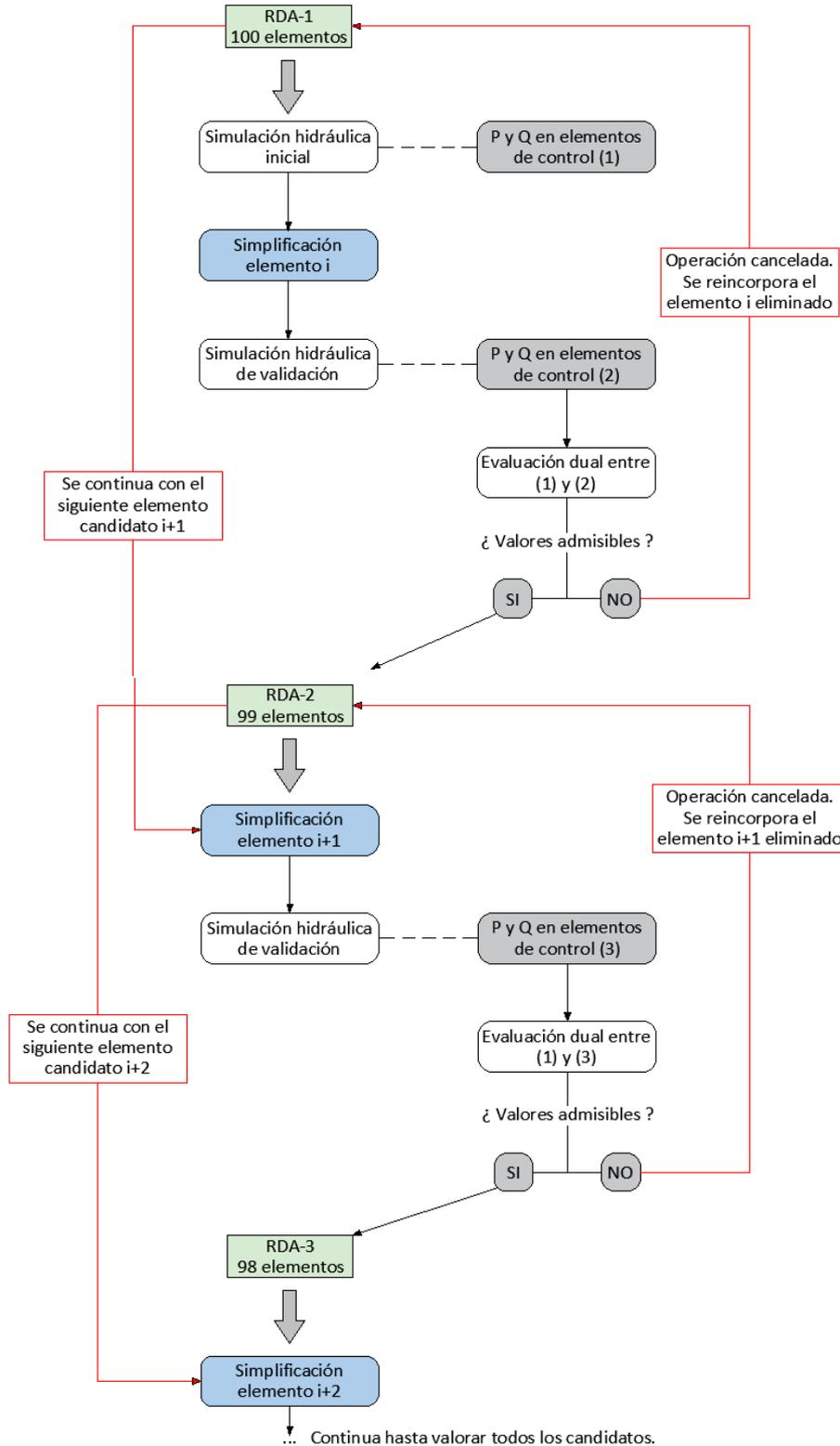


Figura 31 – Diagrama de flujo de algoritmo de validación de la simplificación.

Habiendo descrito los algoritmos de simplificación y validación, así como la forma en que estos interactúan, se presenta en la Figura 32 el diagrama de flujo completo de la metodología de simplificación propuesta. En la misma se puede apreciar su carácter iterativo y la evaluación de eficiencia que se ejecuta de manera continua durante el proceso de reducción.

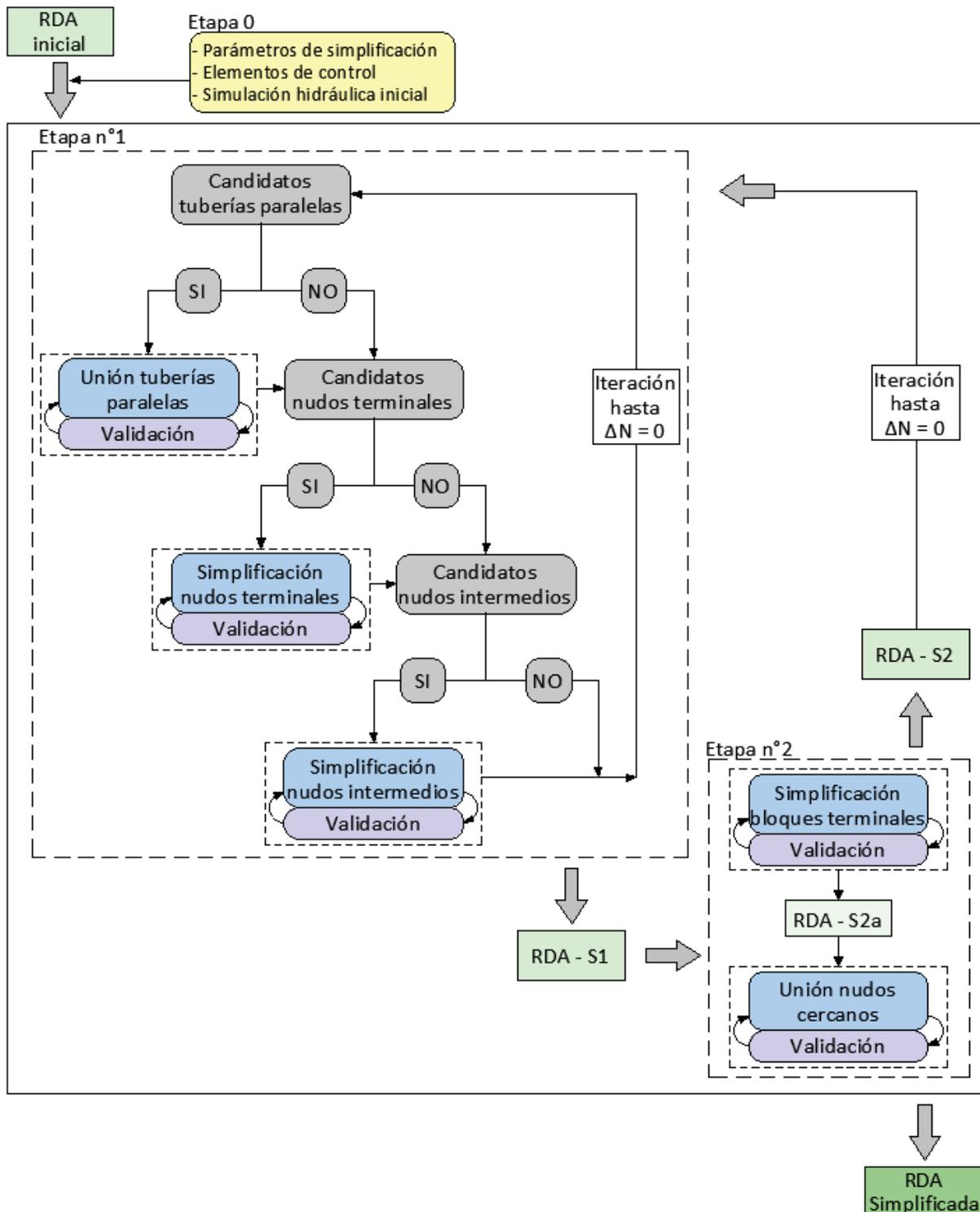


Figura 32 - Diagrama de flujo de algoritmo de simplificación y validación.

Para facilitar la interpretación, se presenta en la Tabla 6 a continuación el flujo de ejecución completo de la metodología propuesta, detallando de forma descriptiva las tareas y subtareas a ejecutar para su aplicación.

Tabla 6 - Pasos de metodología de simplificación propuesta.

Etapa	Tarea	Subtarea	Comentarios	
<b>0</b>	1	Selección de RDA a simplificar.	Punto de partida.	
	2	Definición de parámetros de simplificación.	Valores límite para validación y selección de candidatos.	
	3	Definición de elementos de control.	Para medición de P y Q.	
	4	Simulación hidráulica inicial.	Valores de referencia para validación (1).	
<b>1</b>	5	Búsqueda de tuberías paralelas candidatas a ser unidas ( $C_{para}$ ).	Según parámetros de simplificación.	
	6a	Si $C_{para} = 0 \rightarrow$ Paso a Tarea n°7.		
	<b>6b</b>	<b>Si <math>C_{para} &gt; 0 \rightarrow</math> Unión de tuberías paralelas.</b>		
	6b.1	Operación de simplificación :	Unión de dos tuberías paralelas.	Proceso iterativo hasta evaluar y ejecutar, si procede, la unión de todas las tuberías paralelas candidatas.
	6b.2	Algoritmo de validación:	Simulación hidráulica de validación.	
	6b.3		Comparación de resultados con (1).	
	6b.4		Validación o cancelación de la unión.	
	7	Búsqueda de nudos terminales candidatos a ser eliminados ( $C_{term}$ ).		Según parámetros de simplificación.
	8a	Si $C_{term} = 0 \rightarrow$ Paso a Tarea n°9.		
	<b>8b</b>	<b>Si <math>C_{term} &gt; 0 \rightarrow</math> Simplificación de nudos terminales.</b>		
	8b.1	Operación de simplificación :	Eliminación de nudos terminales.	Proceso iterativo hasta evaluar y ejecutar, si procede, la eliminación de todos los nudos terminales candidato.
	8b.2	Algoritmo de validación:	Simulación hidráulica de validación.	
	8b.3		Comparación de resultados con (1).	
	8b.4		Validación o cancelación de la eliminación.	
	9	Búsqueda de nudos intermedios candidatos a ser eliminados ( $C_{inter}$ ).		Según parámetros de simplificación.
	10a	Si $C_{inter} = 0 \rightarrow$ Paso a operación 11.		
	<b>10b</b>	<b>Si <math>C_{inter} &gt; 0 \rightarrow</math> Simplificación de nudos intermedios.</b>		
	10b.1	Operación de simplificación :	Eliminación de nudos intermedios.	Proceso iterativo hasta evaluar y ejecutar, si procede, la eliminación de todos los nudos intermedios candidato.
	10b.2	Algoritmo de validación:	Simulación hidráulica de validación.	
	10b.3		Comparación de resultados con (1).	
10b.4		Validación o cancelación de la eliminación.		
<b>11</b>	<b>Fin de ciclo Etapa n°1. Se repite iterativamente hasta <math>\Delta N = 0</math> (equivalente a <math>C_{para} = C_{term} = C_{inter} = 0</math>). Resultado parcial: RDA – S1</b>			

<b>2</b>	12	Búsqueda de bloques terminales candidatos a ser eliminados ( $C_{bloq}$ )		
	13a	Si $C_{bloq} = 0 \rightarrow$ Paso a operación 14.		
	<b>13b</b>	<b>Si <math>C_{bloq} &gt; 0 \rightarrow</math> Simplificación de bloques terminales.</b>		
	13b.1	Operación de simplificación :	Eliminación de bloques terminales	Proceso iterativo hasta evaluar y ejecutar, si procede, la eliminación de todos los bloques terminales candidato.
	13b.2	Algoritmo de validación:	Simulación hidráulica de validación.	
	13b.3		Comparación de resultados con (1).	
	13b.4		Validación o cancelación de la eliminación.	
	14	Búsqueda de nudos cercanos candidatos a ser unidos ( $C_{union}$ )		
	14a	Si $C_{union} = 0 \rightarrow$ Paso a operación 15.		
	<b>14b</b>	<b>Si <math>C_{union} &gt; 0 \rightarrow</math> Simplificación de nudos cercanos.</b>		
	14b.1	Operación de simplificación :	Unión de nudos cercanos.	Proceso iterativo hasta evaluar y ejecutar, si procede, la unión de todos los nudos cercanos candidato.
	14b.2	Algoritmo de validación:	Simulación hidráulica de validación.	
	14b.3		Comparación de resultados con (1).	
	14b.4		Validación o cancelación de la unión.	
	<b>15</b>	<b>Fin de ciclo Etapa n°2. Resultado parcial: RDA – S2</b>		
Se ejecuta nuevamente todo el proceso de forma iterativa comenzando desde la Etapa n°1 hasta que no queden elementos simplificables ( $\Delta N = 0$ ).				
<b>RESULTADO FINAL: RDA SIMPLIFICADA</b>				

La sección a continuación se dedica a la explicación de los parámetros de simplificación, cuya correcta definición es fundamental para obtener los resultados de esqueletización deseados.

### 3.2.4 Parámetros de simplificación y validación

Como se describió al inicio del apartado anterior, el primer paso para realizar una simplificación es identificar aquellos elementos susceptibles de ser eliminados, a los cuales se denomina “candidatos”. Este reconocimiento debe hacerse en base a parámetros topológicos e hidráulicos. Por otra parte, al momento de describir el algoritmo de validación, se explicó que es necesario fijar los umbrales admisibles para los indicadores de eficiencia, a partir de los cuales se aceptan o rechazan las simplificaciones. Tanto los parámetros de selección de candidatos como los de eficiencia deben ser establecidos previo al inicio de la esqueletización en función del objetivo buscado con la misma.

Son muchas las finalidades para las cuales alguien puede necesitar reducir una RDA. Mejorar la interpretación de la red, hacer análisis del funcionamiento global del sistema e implementar algoritmos de optimización son solo algunas de ellas. Más allá de esta diversidad, lo cierto es que todas tienen un objetivo en común: obtener una red estratégica a partir de la red detallada minimizando la pérdida de información.

El método propuesto cuenta con una serie de parámetros predefinidos y otros que quedan a libre determinación del usuario. La idea que se persigue a través de esta posibilidad es dotar a la

metodología de una amplia versatilidad, que le permita ser utilizada para múltiples objetivos de reducción. A continuación, se hace una descripción de todos los parámetros intervinientes en la metodología, comenzando con los relacionados con la selección de candidatos y siguiendo con los utilizados en la validación de la simplificación.

Los **parámetros de selección de candidatos** representan el criterio por el cual un nudo o línea se convierte en candidato, es decir, susceptible de ser eliminado o fusionado con otro elemento. Por lo tanto, su carácter es estrictamente topológico.

Seguidamente, se describen cada uno de ellos clasificados según el tipo de elemento.

#### **3.2.4.1 Parámetros de selección de candidatos: TUBERÍAS PARALELAS**

Para que dos tuberías sean candidatas a ser unidas deben:

- a. Tener los mismos nudos extremos.
- b. Ser tuberías propiamente dichas (no bombas ni válvulas ni ningún otro elemento tipo línea)

#### **3.2.4.2 Parámetros de selección de candidatos: NUDOS TERMINALES**

Las condiciones que debe cumplir un nudo terminal para ser candidato a ser eliminado son:

- a. Ser una conexión (no tanques ni embalses).
- b. No ser una fuente de calidad (p.ej. inyección de cloro).
- c. Su nudo contiguo no debe ser un reservorio (no tanques ni embalses).
- d. Su índice de conectividad debe ser = 1 (solo estar conectado a una línea).
- e. La línea a la cual está conectado debe ser una tubería (no bomba ni válvula).

#### **3.2.4.3 Parámetros de selección de candidatos: NUDOS INTERMEDIOS**

Las condiciones que debe cumplir un nudo intermedio para ser candidato a ser eliminado son:

- a. Ser una conexión (no tanques ni embalses).
- b. No ser una fuente de calidad (p.ej. inyección de cloro).
- c. Tener índice de conectividad = 2 (solo estar conectado a dos líneas).
- d. Tener una demanda base menor a la máxima admisible.

Este punto es uno de los parámetros que se deja a criterio del usuario de la metodología. La idea de limitar la demanda base que puede tener un nudo intermedio simplificable busca evitar generar grandes cambios en las presiones y caudales trasegados de la red producto de la relocalización de demanda que se realiza al momento de la simplificación. Según el objetivo perseguido con la esqueletización, estas diferencias pueden ser más o menos conflictivas y es por ello que se le brinda la posibilidad al usuario de controlarlo.

- e. Las líneas a las cuales está conectado deben ser tuberías (no bombas ni válvulas).
- f. La diferencia de diámetros de las líneas a las que está conectado no debe ser mayor a la admisible. Este punto es otro de los parámetros que se deja a criterio del usuario de la metodología. A continuación se explica su fundamento.

Diferencia de diámetro admisible (%):

Este valor porcentual se aplica para seleccionar nudos candidatos intermedios y su función es limitar la diferencia de diámetro máxima admisible entre las tuberías en serie a unir, como muestra la Figura 33. Se calcula tomando como base el diámetro mayor de ellas:

$$\Delta\varnothing_{adm} = \left( \frac{d_1 - d_2}{d_1} \right) \cdot 100 \text{ con } d_1 > d_2 \tag{16}$$



Figura 33 - En verde, posible nudo intermedio candidato.

El objetivo de limitar esta diferencia es evitar que se realicen uniones de tuberías con diámetros muy dispares, como puede ocurrir entre las mallas principales y las tuberías subsidiarias. Con un simple análisis como el que se muestra en la Tabla 7, el usuario puede definir hasta que porcentaje admitir en base al objetivo de simplificación buscado. El caso más riguroso es para  $\Delta\varnothing_{adm} = 0$ , y se aplica cuando solo quieren unirse tuberías de igual diámetro para evitar distorsionar el modelo con diámetros equivalentes (explicado en 3.3.3 Simplificación de nudos intermedios).

Tabla 7 - Ejemplo de diferencia porcentual entre diámetros (mm).

Ø (mm)	50.80	101.60	152.40	203.20	254.00	304.80	355.60	406.40	457.20	508.00	558.80	609.60	660.40	711.20
50.80	0%													
101.60	50%	0%												
152.40	67%	33%	0%											
203.20	75%	50%	25%	0%										
254.00	80%	60%	40%	20%	0%									
304.80	83%	67%	50%	33%	17%	0%								
355.60	86%	71%	57%	43%	29%	14%	0%							
406.40	88%	75%	63%	50%	38%	25%	13%	0%						
457.20	89%	78%	67%	56%	44%	33%	22%	11%	0%					
508.00	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%				
558.80	91%	82%	73%	64%	55%	45%	36%	27%	18%	9%	0%			
609.60	92%	83%	75%	67%	58%	50%	42%	33%	25%	17%	8%	0%		
660.40	92%	85%	77%	69%	62%	54%	46%	38%	31%	23%	15%	8%	0%	
711.20	93%	86%	79%	71%	64%	57%	50%	43%	36%	29%	21%	14%	7%	0%

- g. La diferencia de rugosidades de las líneas a las que está conectado no debe ser mayor a la admisible. Este punto es otro de los parámetros que se deja a criterio del usuario de la metodología. A continuación se explica su fundamento.

Diferencia de rugosidades admisible (%):

Este valor porcentual se aplica para seleccionar nudos candidatos intermedios y su función es limitar la diferencia de rugosidad máxima admisible entre las tuberías en serie a unir, como muestra la Figura 34. Se calcula tomando como base la rugosidad mayor de ellas:

$$\Delta rug_{adm} = \left( \frac{r_1 - r_2}{r_1} \right) \cdot 100 \text{ con } r_1 > r_2 \tag{17}$$



Figura 34 - En verde, posible nudo intermedio candidato.

El objetivo de limitar esta diferencia es darle la opción al usuario de la metodología de controlar las uniones de tubería que se realizan y obtener por ejemplo una red simplificada pero que mantiene todas las rugosidades de la red original, y no rugosidades equivalentes producto de la unión de conductos con distinto valor de las mismas, tal como se explica en el apartado 3.3.3.

De modo similar al caso de diámetros, se presenta un modelo de tabla (Tabla 8) que el usuario puede confeccionar con los valores de su RDA de estudio. En este caso los valores corresponden al coeficiente C de la fórmula de Hazen-Williams (1905), en el cual la comparación entre coeficientes puede realizarse de forma directa.

Tabla 8 - Ejemplo de diferencia porcentual entre rugosidades (H-W 1905)

r (H-W)	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160
95	0%													
100	5%	0%												
105	10%	5%	0%											
110	14%	9%	5%	0%										
115	17%	13%	9%	4%	0%									
120	21%	17%	13%	8%	4%	0%								
125	24%	20%	16%	12%	8%	4%	0%							
130	27%	23%	19%	15%	12%	8%	4%	0%						
135	30%	26%	22%	19%	15%	11%	7%	4%	0%					
140	32%	29%	25%	21%	18%	14%	11%	7%	4%	0%				
145	34%	31%	28%	24%	21%	17%	14%	10%	7%	3%	0%			
150	37%	33%	30%	27%	23%	20%	17%	13%	10%	7%	3%	0%		
155	39%	35%	32%	29%	26%	23%	19%	16%	13%	10%	6%	3%	0%	
160	41%	38%	34%	31%	28%	25%	22%	19%	16%	13%	9%	6%	3%	0%

< 5%
5 - 15%
15 - 25%
25 - 35%
> 35%

Si para las pérdidas de carga se utiliza la fórmula de Darcy – Weisbach (1845) presentada en la ecuación (18), los valores de rugosidad a comparar corresponden al coeficiente  $\epsilon$  a partir del cual se obtiene el factor de fricción  $f$  mediante la ecuación (19) de Swamee – Jain (1976).

$$\Delta h_f = \frac{8 \cdot f \cdot L}{\pi^2 \cdot \emptyset^5 \cdot g} \cdot Q^2 \quad (18)$$

Donde:

$hf$  = pérdida de energía por fricción (D-W, 1845).

$f$  = coeficiente de fricción de la tubería  $f(Q)$ .

$Q$  = caudal trasegado por la tubería.

$\emptyset$  = diámetro de la tubería.

$L$  = longitud de la tubería.

$g$  = aceleración de la gravedad.

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{\varepsilon / \varnothing_{eq}}{3.7} + \frac{5.74}{R_e} \right) \right]^2} \quad (19)$$

Donde:

$f$  = coeficiente de fricción de la tubería según ecuación Swamee – Jain (1976)

$\varepsilon$  = rugosidad del material

$R_e$  = número de Reynolds =  $\frac{v_s \cdot \varnothing}{\nu}$

$v_s$  = velocidad del agua en la tubería (m/s) =  $\frac{4 \cdot Q}{\varnothing^2 \cdot \pi}$

$\nu$  = viscosidad cinemática del agua (m<sup>2</sup>/s)

Resulta interesante en este caso, hacer un análisis de la influencia que tiene el coeficiente de rugosidad  $\varepsilon$  en el cálculo del factor  $f$ , que ayude al usuario a definir la diferencia máxima admisible en la simplificación. A los fines prácticos, se estudia la variación de  $f$  para el caso de una tubería de diámetro 200 mm y velocidad 1 m/s. Los valores de  $\Delta rug \%$  y  $\Delta f \%$  se calculan según la ecuación (17) entre valores consecutivos del coeficiente  $\varepsilon$ . El resumen se presenta en la Tabla 9.

Tabla 9 – Análisis de influencia del coeficiente de rugosidad  $\varepsilon$  en el factor de fricción  $f$

$\varepsilon$	$\Delta rug \%$	$f$	$\Delta f \%$
0.001	-	0.016	-
0.005	80%	0.016	0%
0.01	50%	0.016	0%
0.1	90%	0.019	16%

#### 3.2.4.4 Parámetros de selección de candidatos: BLOQUES TERMINALES

Las condiciones que debe cumplir un bloque terminal para ser candidato a ser eliminado son:

- Ser un conjunto de nudos y tuberías conectado al resto de la red mediante un solo nudo.
- No estar compuesto por reservorios de agua, bombas, válvulas o cualquier otro elemento que pueda generar gran influencia en el resto de la red.

#### 3.2.4.5 Parámetros de selección de candidatos: NUDOS CERCANOS

Las condiciones que deben cumplir los nudos cercanos para ser candidatos a ser fusionados son:

- Encontrarse a una distancia menor a la máxima admisible definida por el usuario. Este punto es otro de los parámetros que se deja a criterio del usuario de la metodología. A continuación se explica su fundamento.

##### Distancia entre nudos admisible:

El objetivo de limitar esta distancia es evitar la eliminación de grandes longitudes de tuberías, lo cual podría tener algún efecto no deseado en el funcionamiento de la red. En base a esto, se deja a criterio del usuario su definición considerando las particularidades de la RDA de estudio y el fin buscado con la simplificación. La Figura 35 presenta un caso de ejemplo.

$$L_i \leq L_{adm} \tag{20}$$

Donde:

$L$  = longitud de la tubería que vincula nudos cercanos.

$i$  = subíndice de las tuberías que vinculan los nudos cercanos.

$L_{adm}$  = longitud máxima admisible para realizar la unión de nudos.

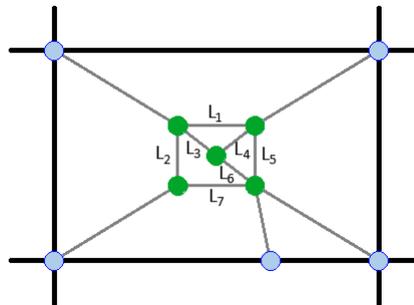


Figura 35 - En verde, posibles candidatos a unión por nudos cercanos.

- b. Poseer diferencias de cotas menores a un porcentaje máximo admisible definido por el usuario. Este punto es otro de los parámetros que se deja a criterio del usuario de la metodología. A continuación se explica su fundamento.

Diferencia de cotas admisible (%):

El objetivo de limitar esta diferencia es garantizar en cierta manera que los nudos a unir posean características hidráulicas similares, principalmente en cuanto a presiones. En base a esto, se deja a criterio del usuario su definición considerando la variación de cota de la RDA y el fin buscado con la simplificación. Se calcula de forma porcentual, tomando como base la cota mayor de los nudos a unir. La Figura 36 presenta un caso de ejemplo.

$$\Delta h_{adm} = \left( \frac{h_{max} - h_i}{h_{max}} \right) \cdot 100$$

Donde:

$h_{max}$  = máxima cota de los nudos cercanos a unir. (21)

$h_i$  = cota de los nudos cercanos a unir.

$i$  = subíndice de los nudos cercanos a unir.

$\Delta h_{adm}$  = diferencia de cota máxima admisible para realizar la unión de nudos.

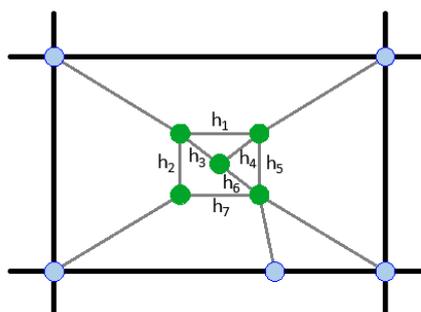


Figura 36 - En verde, posibles candidatos a unión por nudos cercanos.

### 3.2.4.6 Parámetros de validación

Como su nombre lo indica, los parámetros de validación están relacionados con la aceptación o aprobación de cada simplificación que se realiza. Esto se ejecuta mediante el cálculo de un indicador de eficiencia de series y un indicador de criterio porcentual, como se explicó en el apartado 3.2.3.

Ambos indicadores se calculan en base a comparar los valores de presión y caudal que poseen los elementos de control en la red original y en la red simplificada. Por lo tanto, lo primero que el usuario debe definir es la cantidad de elementos de control que se utilizarán para la validación.

En el caso del indicador de eficiencia de series (p. ej. índice de Nash-Sutcliffe) lo que el usuario debe determinar es el valor mínimo que puede adoptar dicho índice para que la simplificación sea validada. Por ejemplo, si el usuario define que  $NS > 0.80$ , para que la eliminación de un elemento X sea validada, el valor de NS calculado para las series de presiones y caudales de los elementos de control (comparando la red original con la red sin el nudo X) debe ser siempre superior a 0.80. Basta con que en solo un elemento sea inferior, para que la simplificación no sea aprobada y en consecuencia el elemento X no sea eliminado.

Con el indicador de criterio porcentual ocurre lo mismo. La única diferencia es que en este caso, al tratarse del  $E_{maxr}$  (Error máximo relativo:  $\Delta Q_{adm}$  y  $\Delta P_{adm}$ ) el usuario debe definir los errores máximos admisibles para las presiones y los caudales horarios de los elementos de control, siempre comparando red original con red simplificada.

A modo de resumen de este capítulo, la Tabla 10 presenta todos los parámetros de la metodología cuyos valores deben ser definidos por el usuario.

Tabla 10 - Parámetros a definir por el usuario de la metodología.

Función	Operación	Parámetro
Selección de candidatos	Simplificación nudos intermedios	Diferencia de diámetro admisible $\Delta \emptyset_{adm}$
		Diferencia de rugosidad admisible $\Delta Rug_{adm}$
		Demanda base máxima $Dem_{max}$
	Unión nudos cercanos	Longitud máxima admisible
		Diferencia de cota máxima admisible $\Delta h_{max}$
Validación de la simplificación	Validación	Número de elementos de control
		Valor admisible de indicador de eficiencia de series de presiones
		Valor admisible de indicador de eficiencia de series de caudales
		Diferencia de caudal admisible $\Delta Q_{adm}$
		Diferencia de presión admisible $\Delta P_{adm}$

### 3.2.4.7 Presión mínima de consigna

La presión mínima de consigna es un parámetro que se debe definir en casi todas las operaciones de simplificación (exceptuando la unión de tuberías paralelas en la cual no es necesaria). Se trata básicamente de la presión mínima que debe haber en todos los nudos de la RDA y generalmente se define con el objetivo de garantizar el correcto suministro. Este valor no influye estrictamente en la selección de candidatos sino que se tiene en cuenta al calcular las curvas de alturas piezométricas de consigna durante el proceso de reducción, tal como se explica en el apartado 3.3. Evidentemente, este

valor debe ser definido por el usuario de la metodología en base a las características del servicio de abastecimiento de agua que desee analizar.

$$P_{min} = \text{presión mínima en nudos de consumo} \quad (22)$$

### 3.3 Descripción de las operaciones de simplificación

Explicada la metodología y descritos los parámetros de simplificación en las secciones anteriores, se presentan aquí los cálculos que se realizan en cada operación de reducción, los cuales persiguen dos objetivos diferenciados. Por un lado, minimizar el impacto de las simplificaciones en el funcionamiento hidráulico de la RDA y, por otra parte, almacenar los datos de los elementos eliminados siguiendo la premisa de que esqueletizar no debe significar perder información.

#### 3.3.1 Unión de tuberías paralelas

Como su nombre lo indica, la unión de tuberías paralelas consiste en reemplazarlas por un solo conducto hidráulicamente equivalente. Para ello, el desafío principal reside en lograr que la línea unificada genere la misma pérdida de carga que los dos conductos originales. La Figura 37 presenta un caso de ejemplo.

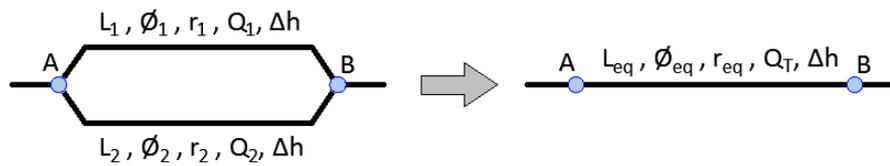


Figura 37 - Ejemplo de unión de tuberías paralelas.

Donde:

$L_1$  = Longitud de una de la tubería 1.

$L_2$  = Longitud de una de la tubería 2.

$\varnothing_1$  = Diámetro de la tubería 1.

$\varnothing_2$  = Diámetro de la tubería 2.

$r_1$  = rugosidad de la tubería 1.

$r_2$  = rugosidad de la tubería 2.

$Q_1$  = caudal de la tubería 1.

$Q_2$  = caudal de la tubería 2.

$\Delta h$  = caída de altura piezométrica entre el nudo A y el nudo B.

$L_{eq}$  = longitud de la tubería equivalente.

$\varnothing_{eq}$  = diámetro de la tubería equivalente.

$r_{eq}$  = rugosidad de la tubería equivalente.

$Q_T$  = caudal de la tubería equivalente.

Los parámetros topológicos equivalentes se obtienen en esta metodología de la forma explicada a continuación. En caso de que existieran más de dos tuberías paralelas, la técnica siguiente se aplica en forma sucesiva de a pares de tuberías, hasta obtener una única equivalente a todas.

### 3.3.1.1 Longitud equivalente

Se plantea una longitud equivalente como promedio ponderado según los diámetros de cada tubería:

$$L_{eq} = \frac{L_1 \cdot \varnothing_1 + L_2 \cdot \varnothing_2}{\varnothing_1 + \varnothing_2} \quad (23)$$

### 3.3.1.2 Diámetro equivalente

Si la fórmula de pérdida de carga por fricción utilizada es la de Hazen – Williams (1905), se plantea un diámetro equivalente como promedio ponderado según las longitudes de cada tubería:

$$\varnothing_{eq} = \frac{L_1 \cdot \varnothing_1 + L_2 \cdot \varnothing_2}{L_1 + L_2} \quad (24)$$

Si por el contrario la fórmula de pérdidas usada es la de Darcy – Weisbach (1845), el diámetro equivalente debe calcularse junto con la rugosidad equivalente de forma iterativa como se explica seguidamente.

### 3.3.1.3 Pérdida de carga equivalente

Para garantizar que la pérdida de energía sea igual tanto en la RDA original como en la RDA simplificada, se calculan coeficiente de rugosidad y/o diámetros equivalentes según la ecuación de pérdida de carga que emplee el modelo.

Cabe aclarar que no se tienen en cuenta aquí mermas energéticas locales por accesorios de red (p. ej. Válvulas) puesto que, tal como se explicó en el apartado 3.2.4.1, para que dos líneas paralelas puedan unirse estas deben ser tuberías ordinarias.

#### a. Pérdida de carga equivalente con ecuación de Hazen – Williams (1905)

La Figura 38 presenta la nomenclatura que se utilizará en este apartado.

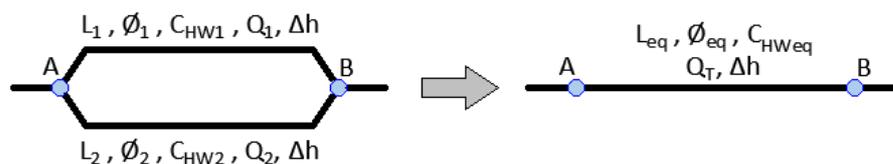


Figura 38 - Unión de tuberías con ecuación Hazen – Williams (1905).

Donde:

$C_{HW1}$  = coeficiente de rugosidad de la tubería 1 según ecuación de H-W.

$C_{HW2}$  = coeficiente de rugosidad de la tubería 2 según ecuación de H-W.

La ecuación de Hazen – Willams (H-W) de pérdida de energía puede reescribirse como:

$$\Delta h_f = 10.648 \left( \frac{1}{C_{HW}} \right)^{1.852} \cdot \frac{Q^{1.852}}{\varnothing^{4.871}} \cdot L = R \cdot Q^{1.852} \quad (25)$$

Donde:

$hf$  = pérdida de energía por fricción.

$C_{HW}$  = coeficiente de rugosidad de la tubería según H-W.

$Q$  = caudal trasegado por la tubería.

$\emptyset$  = diámetro de la tubería.

$L$  = longitud de la tubería.

$R$  = resistencia de la tubería.

En base a la Figura 38, la pérdida de carga entre el nudo A y el nudo B es:

$$\Delta h = H_A - H_B = R_1 \cdot Q_1^{1.852} \quad (26)$$

$$\Delta h = H_A - H_B = R_2 \cdot Q_2^{1.852} \quad (27)$$

$$\Delta h = H_A - H_B = R_{eq} \cdot (Q_1 + Q_2)^{1.852} \quad (28)$$

Donde:

$\Delta h$  = diferencia de altura piezométrica entre el nudo A y el nudo B.

$H_A$  = altura piezométrica en el nudo A.

$H_B$  = altura piezométrica en el nudo B.

$Q_1$  = caudal trasegado por la tubería 1.

$Q_2$  = caudal trasegado por la tubería 2.

$R_1$  = resistencia de la tubería 1.

$R_2$  = resistencia de la tubería 2.

$R_{eq}$  = resistencia equivalente.

A partir de (28) el caudal total que fluye por la tubería unificada es:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 = \left(\frac{\Delta h}{R_1}\right)^{\frac{1}{1.852}} + \left(\frac{\Delta h}{R_2}\right)^{\frac{1}{1.852}} \quad (29)$$

Operando a partir de (29) la pérdida de carga entre A y B es:

$$\Delta h = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_1^{1/1.852}} + \frac{1}{R_2^{1/1.852}}\right)^{1.852}} \cdot Q_T^{1.852} \quad (30)$$

Y finalmente la resistencia equivalente que debe tener la tubería unificada se escribe a partir de (30) como:

$$R_{eq} = \frac{1}{\left( \frac{1}{R_1^{1/1.852}} + \frac{1}{R_2^{1/1.852}} \right)^{1.852}} = \frac{\Delta h}{Q_T^{1.852}} \quad (31)$$

Conocida la resistencia equivalente de la tubería unificada, se obtiene el valor del coeficiente  $C_{HW}$  equivalente a partir de la ecuación (25) de H - W.

$$C_{HW_{eq}} = \left( \frac{R_{eq} \cdot \varnothing_{eq}^{4.871}}{10.648 \cdot L_{eq}} \right)^{-1/1.852} \quad (32)$$

Por lo tanto, reemplazando las tuberías 1 y 2 por una tubería con longitud  $L_{eq}$ , diámetro  $\varnothing_{eq}$  y coeficiente de rugosidad  $C_{HW_{eq}}$  se garantiza que la simplificación mantiene las mismas propiedades hidráulicas que la red original en cuanto a presión en los nudos.

b. Pérdida de carga equivalente con ecuación de Darcy - Weisbach (1845)

La Figura 39 presenta la nomenclatura que se utilizará en este apartado.

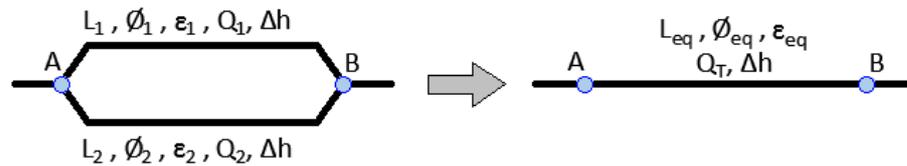


Figura 39 - Unión de tuberías con ecuación Darcy - Weisbach (1845).

Donde:

$\varepsilon_1$  = rugosidad del material de la tubería 1.

$\varepsilon_2$  = rugosidad del material de la tubería 2.

Puesto que la ecuación de Darcy-Weisbach (D-W) utiliza un coeficiente de fricción  $f(Q)$  que es función del caudal, el cálculo de la rugosidad equivalente resulta ser más complejo. La ecuación de D-W puede escribirse de la siguiente manera:

$$\Delta h_f = \frac{8 \cdot f \cdot L}{\pi^2 \cdot \varnothing^5 \cdot g} \cdot Q^2 = R \cdot Q^2 \quad (33)$$

Donde:

$h_f$  = pérdida de energía por fricción.

$f$  = coeficiente de fricción de la tubería  $f(Q)$ .

$Q$  = caudal trasegado por la tubería.

$\varnothing$  = diámetro de la tubería.

$L$  = longitud de la tubería.

$g$  = aceleración de la gravedad.

$$R = \text{resistencia de la tubería} = \frac{8 \cdot f \cdot L}{\pi^2 \cdot \varnothing^5 \cdot g}$$

De forma análoga al análisis realizado para H-W, operando a partir de (28)(28) el caudal total que fluye por la tubería unificada es:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 = \sqrt{\Delta h} \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_2}} \right) \quad (34)$$

Donde:

$R_1$  = resistencia de la tubería 1.

$R_2$  = resistencia de la tubería 2.

En base a lo anterior, la pérdida de carga entre A y B puede escribirse como:

$$\Delta h = \frac{1}{\left( \frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_2}} \right)^2} \cdot Q_T^2 \quad (35)$$

Y finalmente la resistencia equivalente que debe tener la tubería unificada se expresa a partir de (33) y (35) y como:

$$R_{eq} = \frac{1}{\left( \frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_2}} \right)^2} = \frac{\Delta h}{Q_T^2} \quad (36)$$

$$R_{eq} = \frac{8 \cdot f \cdot L}{\pi^2 \cdot \varnothing^5 \cdot g} \quad (37)$$

El valor de la  $R_{eq}$  es un dato conocido calculado a partir de la simulación hidráulica en la red original.

Como ya ha sido mencionado, a diferencia del  $C_{H-W}$ , el factor de fricción  $f$  no es constante sino que depende del número de Reynolds (1883) y por tanto del caudal. Según la ecuación de Swamee – Jain (1976) su valor es:

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{\varepsilon / \varnothing}{3.7} + \frac{5.74}{Re} \right) \right]^2} \quad (38)$$

O a partir de (37):

$$f = \frac{R_{eq} \cdot \pi^2 \cdot g \cdot \varnothing^5}{8 \cdot L_{eq}} \quad (39)$$

Donde:

$f$  = factor de fricción de Swamee – Jain (1976).

$\varepsilon$  = rugosidad del material.

$\emptyset$  = diámetro de la tubería.

$$R_e = \text{número de Reynolds} = \frac{v_s \cdot \emptyset}{\nu}$$

$$v_s = \text{velocidad del agua en la tubería (m/s)} = \frac{4 \cdot Q}{\emptyset^2 \cdot \pi}$$

$\nu$  = viscosidad cinemática del agua (m<sup>2</sup>/s).

La rugosidad del material de la tubería unificada se define en este método como:

$$\varepsilon_{eq} = \frac{\varepsilon_1 / \emptyset_1 \cdot L_1 + \varepsilon_2 / \emptyset_2 \cdot L_2}{L_1 + L_2} \quad (40)$$

Como se aprecia en las fórmulas (38) y (39), el diámetro es un parámetro necesario para el cálculo de las pérdidas de carga de la tubería. Por lo tanto, el objetivo es encontrar aquel diámetro equivalente que genere la misma pérdida de energía que las tuberías paralelas originales. Para ello, debe realizarse un proceso iterativo, el cual consiste en variar el valor del diámetro equivalente hasta lograr la convergencia de  $f$ . El ciclo es el siguiente:

1. Estimación inicial de diámetro equivalente:

$$\emptyset_{eq} = \frac{L_1 \cdot \emptyset_1 + L_2 \cdot \emptyset_2}{L_1 + L_2} \quad (41)$$

2. Cálculo de  $f$  con ecuación (38) considerando  $Q_T$ ,  $\emptyset_{eq}$  y  $\varepsilon_{eq}$ .
3. Cálculo de  $f$  con ecuación (39) y comparación con el valor obtenido en el punto anterior:

$$\Delta f = f_{38} - f_{39} \quad (42)$$

Donde:

$\Delta f$  = diferencia de valores de fricción.

$f_{38}$  = factor de fricción calculado con la ecuación (38).

$f_{39}$  = factor de fricción calculado con la ecuación (39).

4. Si  $\Delta f$  es distinto de cero, se varía el  $\emptyset_{eq}$  de forma iterativa hasta que sea cero.

Puesto que generalmente en las RDA reales el caudal cambia a cada hora, el cálculo de  $\emptyset_{eq}$  debe hacerse para cada intervalo horario. El valor final del  $\emptyset_{eq}$  será el promedio de todos los valores horarios  $\emptyset_{eq-i}$ .

$$\emptyset_{eq} = \frac{\sum_i^n \emptyset_{eq-i}}{n} \quad (43)$$

Donde:

$\emptyset_{eq-i}$  = diámetro equivalente calculado para el intervalo horario  $i$ .

$n$  = número de intervalos horarios.

$i$  = intervalo horario con  $i = \{1, 2, \dots, n\}$

De la manera explicada hasta aquí quedan definidos todos los parámetros de la tubería unificada que hacen posible mantener iguales las pérdidas de carga entre red original y la red simplificada.

### 3.3.2 Simplificación de nudos terminales

La simplificación de un nudo terminal consiste en eliminar tanto el nudo final como la tubería que lo conecta con el resto de la red. Tomando como ejemplo la Figura 40, se puede apreciar que en el proceso son removidos tanto el nudo C como la tubería 1.

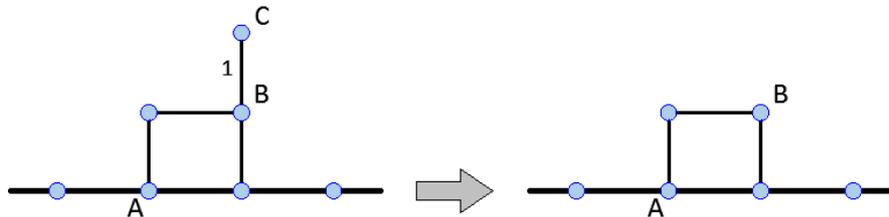


Figura 40 – Ejemplo de simplificación de nudo terminal

Para evitar que la simplificación de ramales terminales genere cambios en el resto de la red, es preciso realizar ciertos ajustes durante el proceso de reducción. Como todas las otras operaciones, la eliminación de nudos terminales se realiza de a uno por vez, para poder validar cada simplificación de forma individual.

#### 3.3.2.1 Relocalización de demanda y patrón de consumo equivalente

La demanda de los nudos terminales debe ser relocalizada en los nudos aguas arriba, a los cuales se denomina nudos base. En la Figura 40, B es el nudo base de C.

$$Dem_{Bs} = Dem_B + Dem_C \quad (44)$$

Donde:

$Dem_{Bs}$  = demanda base del nudo B luego de la simplificación.

$Dem_B$  = demanda base original del nudo B.

$Dem_C$  = demanda base original del nudo C.

Sumadas las demandas base, lo siguiente es calcular un patrón de demanda equivalente que considere los patrones iniciales de cada nudo. Para cada intervalo horario, se obtiene el nuevo coeficiente de demanda de la siguiente forma:

$$C_{iBs} = \frac{Dem_B \cdot C_{iB} + Dem_C \cdot C_{iC}}{Dem_{Bs}} \quad (45)$$

Donde:

$C_{iBs}$  = coeficiente de demanda de la hora i del nudo B luego de la simplificación.

$C_{iB}$  = coeficiente de demanda original de la hora i del nudo B.

$C_{iC}$  = coeficiente de demanda original de la hora i del nudo C.

De esta manera los consumos de agua se mantienen iguales a los de la red original en cuanto a volumen horario demandado.

### 3.3.2.2 Curva de alturas piezométricas de consigna

Una simplificación útil es aquella que conserva, de alguna manera, la información de la porción de red que ha sido eliminada. Como se destacó en el apartado 2.2.4, una de las conclusiones obtenidas del estudio del estado del arte realizado es que la mayoría de las metodologías de esqueletización no permiten al usuario tener una relación directa entre las presiones del modelo original y el modelo simplificado. Específicamente, no se resuelve de forma explícita como garantizar el cumplimiento de las presiones mínimas en la red completa original mediante el análisis de las presiones en la red simplificada. Haciendo una gran aportación en este sentido, el procedimiento aquí propuesto resuelve esta problemática, tal como se explica en el presente apartado y en los sucesivos correspondientes a las demás operaciones de simplificación.

Analizando el caso de simplificación de nudos terminales, para que el usuario del modelo pueda operarla de forma práctica, necesita conocer los requisitos que la red reducida debe cumplir para garantizar que en la parte terminal eliminada se cumplan las condiciones de presión o caudal deseadas. La información sobre caudales necesarios se resuelve mediante la relocalización de demanda descrita en el apartado anterior. Para el caso de las presiones, se obtiene calculando la llamada curva de consigna (Martínez-Solano et al., 2014). La curva de consigna puede definirse como la serie de alturas piezométricas o presiones mínimas requeridas en un nudo de abastecimiento para garantizar que haya suficiente altura en los nudos provistos por él en cada intervalo de cálculo hidráulico. Dicho de otra manera, determina que presión debe tener un nudo a cada hora para garantizar aguas abajo del mismo el cumplimiento de las presiones mínimas requeridas.

Aplicando el concepto anterior al ejemplo de la Figura 40, lo que la metodología propone es calcular la altura piezométrica necesaria en el punto B para garantizar que en el punto C se cumpla siempre su altura de consigna. El cálculo se realiza para cada intervalo horario a partir de la caída de altura piezométrica entre ambos puntos:

$$\Delta H_{BC} = H_B - H_C \quad (46)$$

$$CC_{B-C} = CC_C + \Delta H_{BC} \quad (47)$$

Donde:

$\Delta H_{BC}$  = diferencia de alturas piezométricas entre el nudo B y el nudo C.

$H_B$  = altura piezométrica en el nudo B.

$H_C$  = altura piezométrica en el nudo C.

$CC_{B-C}$  = altura piezométrica de consigna del nudo B considerando el nudo C.

$CC_C$  = altura piezométrica de consigna del nudo C.

La altura de consigna obtenida con la ecuación (47) representa la altura piezométrica que debe tener el nudo B para garantizar la altura piezométrica mínima en el nudo C ( $CC_C$ ).

La  $CC_C$  puede provenir de:

- a. La altura resultante de considerar la presión mínima a garantizar en los nudos de consumo.

$$CC_C = h_C + P_{min} \quad (48)$$

Donde:

$h_C$  = cota del nudo C.

$P_{min}$  = presión mínima a garantizar en los nudos de consumo, definida por el usuario.

- b. La altura de consigna generada en una operación de simplificación anterior (p. ej. si el nudo C hubiera sido anteriormente nudo base de otra conexión X eliminada).

$$CC_C = CC_X + \Delta H_{C-X} \quad (49)$$

Donde:

$CC_X$  = altura piezométrica de consigna del nudo X previamente eliminado.

$\Delta H_{n_{min}-X}$  = diferencia de alturas piezométricas entre el nudo X y el nudo  $n_{min}$ .

En conclusión, la altura piezométrica de consigna de un nudo base debe ser siempre la más exigente que surja de considerar todas las alturas de consigna que se encuentran aguas abajo de él y la presión mínima del propio nudo base.

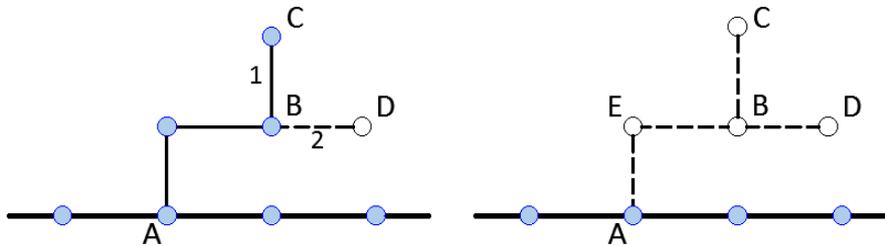


Figura 41 - Ejemplos de secuencia de simplificación para cálculo de curva consigna.

Otro ejemplo de este concepto se puede apreciar la red dibujada a la izquierda de la Figura 41. La altura de consigna final del nudo B será la más exigente entre la calculada para el nudo C, la obtenida para el nudo D y la altura mínima del propio nudo B definida por el usuario que lleva a cabo la simplificación.

$$CC_B = \max \begin{cases} h_B + P_{min} \\ CC_{B-D} = CC_D + \Delta H_{BD} \\ CC_{B-C} = CC_C + \Delta H_{BC} \end{cases} \quad (50)$$

Donde:

$h_B$  = cota del nudo B.

$CC_{B-D}$  = altura piezométrica de consigna del nudo B considerando el nudo D.

$CC_{B-C}$  = altura piezométrica de consigna del nudo B considerando el nudo C.

$CC_D$  = altura piezométrica de consigna del nudo D.

$\Delta H_{BD}$  = diferencia de altura piezométrica entre el nudo B y el nudo D.

$CC_C$  = altura piezométrica de consigna del nudo C.

$\Delta H_{BC}$  = diferencia de altura piezométrica entre el nudo B y el nudo C.

Eventualmente, la simplificación de la red de la Figura 41 llegará al punto en que solo el nudo A permanecerá en la versión reducida. Dicho nudo, tendrá una curva de consigna que garantice el cumplimiento de las presiones mínimas de los nudos E, C, B y D a cada hora del análisis hidráulico. Además, su demanda base será la suma de las demandas base de todos los nudos y su patrón de demanda será equivalente al del consumo horario de los nudos mencionados.

La curva de consigna representa información muy útil para el usuario de la red simplificada ya que le permite saber que valores mínimos de presión debe respetar en el modelo reducido si quiere garantizar las presiones mínimas en la red completa original. Esta herramienta brinda gran practicidad a la metodología, aumentando su atractivo para ser utilizada en tareas de operación de red u algoritmos de optimización, entre otras aplicaciones. Este es sin duda una de los puntos sobresalientes de la propuesta que merecen ser destacados.

### 3.3.3 Simplificación de nudos intermedios

La simplificación de nudos intermedios se basa en eliminar dos tuberías en serie junto con el nudo que las vincula y reemplazarlas por una equivalente. Esta operación se grafica en la Figura 42.

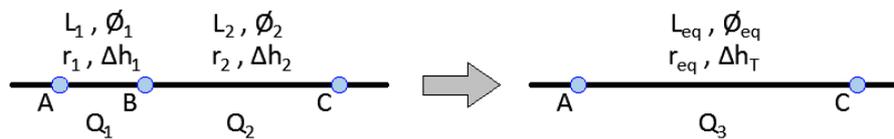


Figura 42 - Ejemplo de simplificación de nudo intermedio.

Donde:

$L_1$  = longitud de la tubería 1 (del nudo A al nudo B).

$L_2$  = longitud de la tubería 2 (del nudo B al nudo C).

$\varnothing_1$  = diámetro de la tubería 1.

$\varnothing_2$  = diámetro de la tubería 2.

$r_1$  = rugosidad de la tubería 1.

$r_2$  = rugosidad de la tubería 2.

$\Delta h_1$  = caída de altura piezométrica entre el nudo A y el nudo B.

$\Delta h_2$  = caída de altura piezométrica entre el nudo B y el nudo C.

$L_{eq}$  = longitud de la tubería equivalente.

$\varnothing_{eq}$  = diámetro de la tubería equivalente.

$r_{eq}$  = rugosidad de la tubería equivalente.

$\Delta h_T$  = caída de altura piezométrica total entre el nudo A y el nudo C.

Al igual que con los nudos terminales, para minimizar el impacto de la simplificación se realizan ajustes relacionados con las demandas, la pérdida de energía y las presiones de consigna.

#### 3.3.3.1 Longitud equivalente

Puesto que el proceso de simplificación está orientado al análisis hidráulico, el cálculo de la longitud equivalente es directo, obteniéndose a partir de la suma algebraica de las longitudes de cada una de

las tuberías a unir, tal como muestra la (51). Si en contrapartida la reducción considerase también la calidad del agua, se debería recalcularse esta longitud teniendo en cuenta el tiempo de viaje y las reacciones químicas que ocurren en la conducción.

$$L_{eq} = L_1 + L_2 \quad (51)$$

### 3.3.3.2 Relocalización de demanda y patrón de consumo equivalente

Mucho se ha escrito sobre si concentrar en los nudos extremos las demandas que son de hecho distribuidas a lo largo de las tuberías es hidráulicamente correcto. Uno de los trabajos más interesantes es el desarrollado por Izquierdo et al. (2013) en el cual se concluye que los errores generados son admisibles cuando el ratio entre caudal de consumo en la línea y caudal circulante de la misma es bajo.

Basado en lo anterior, la metodología presentada tiene como objetivo minimizar los posibles errores por relocalización de consumos. Para ello, se da la posibilidad al usuario de fijar el valor máximo de demanda base que puede tener un nudo intermedio para ser considerado candidato a eliminación, tal como se mencionó en el apartado 3.2.4.3. Adicionalmente, se propone una redistribución de demanda ponderada basada en el diámetro y la longitud de las tuberías originales.

$$Dem_{As} = Dem_B \cdot \frac{L_2 \cdot \emptyset_1}{L_{eq} + \sum \emptyset_{1-2}} \quad (52)$$

$$Dem_{Cs} = Dem_B \cdot \frac{L_1 \cdot \emptyset_2}{L_{eq} + \sum \emptyset_{1-2}} \quad (53)$$

Donde:

$L_{eq}$  = longitud equivalente como suma de las longitudes de las tuberías a unir.

$Dem_{As}$  = demanda base del nudo A luego de la simplificación.

$Dem_{Cs}$  = demanda base del nudo C luego de la simplificación.

$\sum \emptyset_{1-2}$  = suma de diámetros de las tuberías a unir.

Redistribuida la demanda base del nudo a eliminar, lo siguiente es calcular un patrón de demanda equivalente para los nudos extremos, que combine los patrones originales de cada nudo. Para cada intervalo horario, se obtiene el nuevo coeficiente de demanda de la siguiente forma:

$$C_{iAs} = \frac{Dem_A \cdot C_{iA} + Dem_B \cdot C_{iB}}{Dem_{As}} \quad (54)$$

$$C_{iCs} = \frac{Dem_C \cdot C_{iC} + Dem_B \cdot C_{iB}}{Dem_{Cs}} \quad (55)$$

Donde:

$C_{iAs}$  = coeficiente de demanda de la hora i del nudo A luego de la simplificación.

$C_{iCs}$  = coeficiente de demanda de la hora i del nudo C luego de la simplificación.

$C_{iA}$  = coeficiente de demanda original de la hora i del nudo A.

$C_{iB}$  = coeficiente de demanda original de la hora i del nudo B.

$C_{iC}$  = coeficiente de demanda original de la hora i del nudo C.

De esta manera los consumos de agua se mantienen iguales a los de la red original en cuanto a volumen horario demandado y fluirá un nuevo caudal  $Q_3$  desde A hacia C o desde C hacia A, según las condiciones hidráulicas del resto de la red.

### 3.3.3.3 Diámetro equivalente

Si la fórmula de pérdida de carga por fricción utilizada es la de Hazen – Williams (1905), se plantea un diámetro equivalente como promedio ponderado según las longitudes de cada tubería:

$$\varnothing_{eq} = \frac{L_1 \cdot \varnothing_1 + L_2 \cdot \varnothing_2}{L_1 + L_2} \quad (56)$$

Donde:

$\varnothing_{eq}$  = Diámetro de la tubería resultante.

Si por el contrario la fórmula de pérdidas usada es la de Darcy – Weisbach (1845), el diámetro debe calcularse junto con la rugosidad equivalente de forma iterativa como se explica a continuación.

### 3.3.3.4 Pérdida de carga equivalente

Al igual que en técnicas ya descritas, el objetivo que se busca al calcular coeficientes de rugosidad y/o diámetros equivalentes es garantizar que la pérdida de carga entre los nudos extremos (A y C en Figura 42) se mantenga igual a la red original luego de la simplificación. La forma en la que se realizan estos cálculos depende de la ecuación de pérdida de energía por fricción que se utilice.

Cabe aclarar que no se tienen en cuenta aquí mermas energéticas locales por accesorios de red (p. ej. Válvulas) puesto que tal como se explicó en el apartado 3.2.4.3, para que dos líneas en serie puedan unirse deben ser tuberías ordinarias.

#### a. Pérdida de carga equivalente con ecuación de Hazen – Williams (1905)

La Figura 43 presenta la nomenclatura que se utilizará en este apartado.

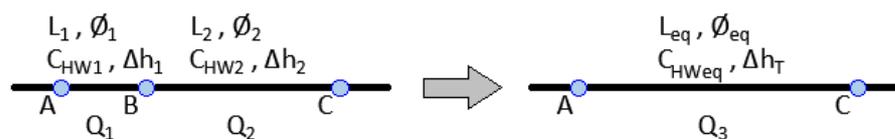


Figura 43 - Unión de tuberías en serie con ecuación de Hazen - Williams (1905).

Donde:

$L_1$  = Longitud de una de la tubería 1.

$L_2$  = Longitud de una de la tubería 2.

$\varnothing_1$  = Diámetro de la tubería 1.

$\varnothing_2$  = Diámetro de la tubería 2.

$C_{HW1}$  = coeficiente de rugosidad de la tubería 1 según ecuación de H-W.

$C_{HW2}$  = coeficiente de rugosidad de la tubería 2 según ecuación de H-W.

$\Delta h_1$  = caída de altura piezométrica entre el nudo A y el nudo B.

$\Delta h_2$  = caída de altura piezométrica entre el nudo B y el nudo C.

$\Delta h_T$  = caída de altura piezométrica total entre el nudo A y el nudo C.

$L_{eq}$  = longitud de la tubería equivalente.

$\emptyset_{eq}$  = diámetro de la tubería equivalente.

$C_{HW_{eq}}$  = rugosidad de la tubería equivalente.

Si la ecuación utilizada por el modelo es la de H-W, se puede implementar de forma directa la expresión propuesta por Walski et al. (2003):

$$C_{HW_{eq}} = \left( \frac{L_{eq}}{\emptyset_{eq}^{4.871}} \right)^{0.54} \cdot \left( \sum_i^2 \frac{L_i}{\emptyset_i^{4.87} \cdot C_{HW_i}^{1.852}} \right)^{-0.54} \quad (57)$$

Donde:

$C_{HW_{eq}}$  = coeficiente de pérdidas de H-W equivalente de la tubería resultante.

$\emptyset_{eq}$  = diámetro equivalente calculado como =  $\frac{L_1 \cdot \emptyset_1 + L_2 \cdot \emptyset_2}{L_1 + L_2}$

$\emptyset_i$  = diámetro de las tuberías a unir.

$L_i$  = longitud de las tuberías a unir.

$C_{HW_i}$  = coeficiente de pérdidas de H-W de las tuberías a unir.

La fórmula desarrollada por Walski et al. surge a partir de operar matemáticamente con las siguientes ecuaciones basadas en la Figura 43:

$$\Delta h_f = 10.648 \left( \frac{1}{C_{HW}} \right)^{1.852} \cdot \frac{Q^{1.852}}{\emptyset^{4.871}} \cdot L = R \cdot Q^{1.852} \quad (25)$$

$$\Delta h_1 = H_A - H_B = R_1 \cdot Q_1^{1.852} \quad (58)$$

$$\Delta h_2 = H_B - H_C = R_2 \cdot Q_2^{1.852} \quad (59)$$

$$\Delta h_{AC} = H_A - H_C = R_{eq} \cdot Q_3^{1.852} \quad (60)$$

El caudal  $Q_3$  será el resultante de la relocalización de demanda explicada en el apartado anterior.

De la manera descrita hasta aquí quedan definidos todos los parámetros de la tubería unificada que hacen posible mantener iguales las pérdidas de carga entre la red original y la red simplificada.

## b. Pérdida de carga equivalente con ecuación de Darcy - Weisbach (1845)

Al igual que se explicó para el cálculo de unión de tuberías paralelas, debido a la dependencia al caudal que el factor de fricción  $f(Q)$  tiene, el cálculo de la rugosidad equivalente debe realizarse mediante un proceso iterativo aplicado a cada intervalo horario. La complejidad adicional que surge en este caso es que a priori no se conoce la dirección del flujo. Por lo tanto el primer paso es averiguar en qué sentido está fluyendo en agua. Una vez conocido, puede tratarse de manera análoga a lo presentado para tuberías paralelas.

Hay tres posibilidades de sentido de flujo, las cuales se presentan a continuación junto con la manera de obtener la rugosidad y diámetro equivalente para cada uno de ellos. El objetivo es encontrar un diámetro y rugosidad de tubería que garanticen que la pérdida de carga entre A y C sea igual tanto en la red original como en la simplificada.

### b.1 Escenario 1: flujo desde el nudo A hacia el nudo C

El primer escenario es descrito en la Figura 44. Se han detallado tanto los caudales circulantes por la tubería como los extraídos por consumo en los nudos (línea de trazos). En este escenario existe un caudal  $Q_3$  fluyendo del nudo A hacia el C, cuyo valor puede obtenerse a partir del  $Q_0$  y el  $Q_{A-B}$ , que son conocidos. Definidos ya  $Q_3$  y  $L_{eq}$  (como se explicó anteriormente), se procede de forma análoga a lo realizado para la unión de tuberías paralelas.

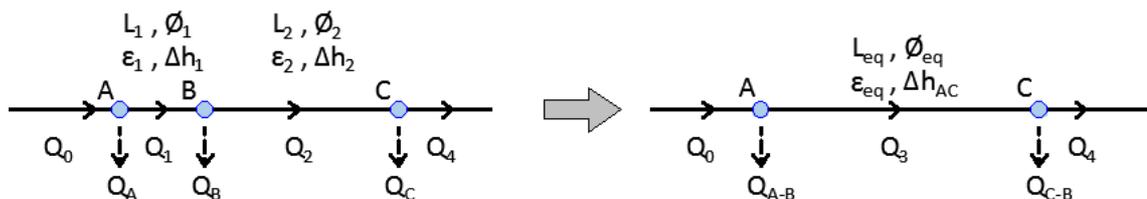


Figura 44 - Simplificación de nudo intermedio con flujo hacia la derecha.

Donde:

$Q_0$  = caudal que ingresa al nudo A.

$Q_A$  = caudal de demanda del nudo A.

$Q_1$  = caudal que fluye desde el nudo A al nudo B =  $Q_0 - Q_A$

$Q_B$  = caudal de demanda del nudo B.

$Q_2$  = caudal que fluye desde el nudo B al nudo C =  $Q_1 - Q_B$

$Q_{A-B}$  = nuevo caudal de demanda del nudo A que incluye parte del  $Q_B$ .

$Q_3$  = caudal que fluye desde el nudo A al nudo C =  $Q_0 - Q_{A-B}$

$Q_4$  = caudal de salida del nudo C =  $Q_0 - Q_A - Q_C$

$Q_{C-B}$  = nuevo caudal de demanda del nudo C que incluye parte del  $Q_B$ .

La rugosidad del material de la tubería unificada se define como:

$$\varepsilon_{eq} = \frac{\varepsilon_1/\phi_1 \cdot L_1 + \varepsilon_2/\phi_2 \cdot L_2}{L_1 + L_2} \quad (61)$$

La pérdida de energía o altura piezométrica desde A hacia C es la suma de las pérdidas parciales:

$$\Delta h_1 = H_A - H_B \quad (62)$$

$$\Delta h_2 = H_B - H_C \quad (63)$$

$$\Delta h_{AC} = \Delta h_1 + \Delta h_2 = H_A - H_C \quad (64)$$

Lo cual puede escribirse a partir de la resistencia de cada tubería (ecuación (33)) como:

$$\Delta h_{AC} = \Delta h_1 + \Delta h_2 = R_1 \cdot Q_1^2 + R_2 \cdot Q_2^2 = R_{eq} \cdot Q_3^2 \quad (65)$$

El valor de la  $R_{eq}$  es un dato conocido calculado a partir de la simulación hidráulica en la red original y puede escribirse a partir de la ecuación (33) y (65) como:

$$R_{eq} = \frac{\Delta h_{AC}}{Q_3^2} = \frac{R_1 \cdot Q_1^2 + R_2 \cdot Q_2^2}{Q_3^2} = \frac{8 \cdot f \cdot L_{eq}}{\pi^2 \cdot \emptyset_{eq}^5 \cdot g} \quad (66)$$

Como ya ha sido mencionado, a diferencia del  $C_{H-W}$ , el factor de fricción  $f$  de Darcy – Weisbach no es constante sino que depende del número de Reynolds (1883) y por tanto del caudal. Según la ecuación de Swamee – Jain (1976) su valor es:

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{\varepsilon / \emptyset_{eq}}{3.7} + \frac{5.74}{R_e} \right) \right]^2} \quad (38)$$

Donde:

$f$  = factor de fricción de Swamee – Jain (1976).

$\varepsilon$  = rugosidad del material.

$\emptyset$  = diámetro de la tubería.

$R_e$  = número de Reynolds =  $\frac{v_s \cdot \emptyset}{\nu}$

$v_s$  = velocidad del agua en la tubería (m/s) =  $\frac{4 \cdot Q}{\emptyset^2 \cdot \pi}$

$\nu$  = viscosidad cinemática del agua (m<sup>2</sup>/s).

Y despejando de la ecuación (66) su valor es:

$$f = \frac{R_{eq} \cdot \pi^2 \cdot g \cdot \emptyset_{eq}^5}{8 \cdot L_{eq}} \quad (67)$$

Como se aprecia en las fórmulas (38) y (67), el diámetro es un parámetro necesario para el cálculo de las pérdidas de carga de la tubería. Para encontrar el valor del mismo que genere la misma pérdida de energía que las tuberías originales debe realizarse un proceso iterativo, tal como se planteó para el caso de tuberías paralelas. El ciclo es el siguiente:

1. Estimación inicial de diámetro equivalente

$$\varnothing_{eq} = \frac{L_1 \cdot \varnothing_1 + L_2 \cdot \varnothing_2}{L_1 + L_2} \quad (56)$$

2. Cálculo de f con ecuación (38) considerando  $Q_3$ ,  $\varnothing_{eq}$  y  $\varepsilon_{eq}$
3. Cálculo de f con ecuación (67) y comparación con el valor obtenido en el punto anterior:

$$\Delta f = f_{38} - f_{67} \quad (68)$$

Donde:

$\Delta f$  = diferencia de valores de fricción.

$f_{38}$  = factor de fricción calculado con la ecuación (38).

$f_{67}$  = factor de fricción calculado con la ecuación (67).

4. El  $\varnothing_{eq}$  buscado es aquel que logre hacer  $\Delta f = 0$ . Se prueban valores de forma iterativa hasta conseguirlo.

Puesto que generalmente en las RDA reales el caudal cambia a cada hora, el cálculo de  $\varnothing_{eq}$  debe hacerse para cada intervalo horario. El valor final del  $\varnothing_{eq}$  será el promedio de todos los valores horarios.

$$\varnothing_{eq} = \frac{\sum_i^n \varnothing_{eq_i}}{n} \quad (69)$$

Donde:

$\varnothing_{eq-i}$  = diámetro equivalente calculado para el intervalo horario i.

n = número de intervalos horarios.

i = intervalo horario con  $i = \{1, 2, \dots, n\}$

De la manera explicada hasta aquí quedan definidos todos los parámetros de la tubería unificada que hacen posible mantener las pérdidas de carga entre red original y red simplificada iguales.

### **b.2 Escenario 2: flujo desde el nudo C hacia el nudo A**

Este caso se resuelve de forma análoga al Escenario 1 por lo tanto no es necesario explicitar su procedimiento.

### **b.3 Escenario 3: flujo desde el nudo A y nudo C hacia el nudo B**

Por último, se menciona el caso presentado en la Figura 45, en el cual el flujo es desde los nudos extremos A y C hacia el nudo central B. Lo que ocurre en este escenario es que al eliminar el nudo intermedio, obligadamente se generará un nuevo sentido de flujo en las tuberías. Esto implica la pérdida de la bidireccionalidad del flujo y por tanto representa un cambio con respecto a la red original.

En base a lo anterior y teniendo en cuenta que este escenario resulta ser atípico en las RDA, se decide controlar este caso de manera indirecta mediante el algoritmo de validación. Si la pérdida de bidireccionalidad mencionada genera un cambio considerable en la red, la validación no será superada y por lo tanto la simplificación será cancelada.

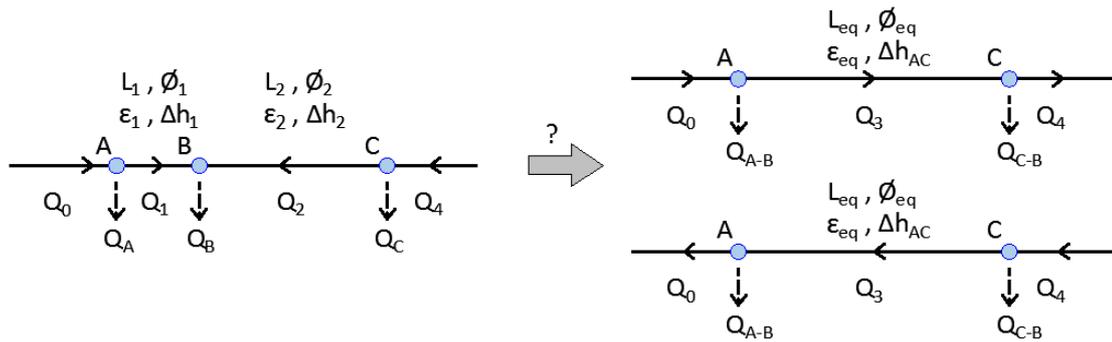


Figura 45 - Simplificación de nudo intermedio con flujo hacia el mismo nudo.

### 3.3.3.5 Curva de alturas piezométricas de consigna

Al igual que para los nudos terminales, y en la búsqueda de no perder información del modelo original, la metodología propuesta incluye el cálculo de la altura piezométrica que deben tener los nudos extremos para garantizar la curva de consigna en el nudo intermedio eliminado. Para poder lograr esto, se deben analizar tres escenarios correspondientes a diferentes direcciones de flujo, como se ejecutó en el apartado anterior.

#### a. Escenario 1: flujo desde el nudo A hacia el nudo C

Basado en la Figura 44 y aplicando el concepto de curva de consigna ya desarrollado para nudos terminales, lo que se propone es calcular la altura necesaria en el punto A para garantizar que en el punto B se cumpla siempre su curva de consigna. El cálculo se realiza para cada intervalo horario a partir de la caída de altura piezométrica entre ambos puntos:

$$\Delta H_{AB} = H_A - H_B \quad (70)$$

$$CC_{A-B} = CC_B + \Delta H_{AB} \quad (71)$$

Donde:

$\Delta H_{AB}$  = diferencia de alturas piezométricas entre el nudo A y el nudo B.

$H_A$  = altura piezométrica en el nudo A.

$H_B$  = altura piezométrica en el nudo B.

$CC_{A-B}$  = altura piezométrica de consigna del nudo A considerando el nudo B.

$CC_B$  = altura piezométrica de consigna del nudo B.

Finalmente, para determinar que curva de alturas de consigna tendrá el nudo A luego de la simplificación, se debe comparar a la curva obtenida en la simplificación del nudo B con la que tenía antes de la reducción, la cual como ya se ha visto puede tener dos orígenes: ser la que surge de la presión mínima definida por el usuario o ser la resultante de operaciones de simplificación anteriores. Como siempre, esto se hace para cada intervalo horario.

$$CC_{As} = \max \left\{ \begin{array}{l} CC_{A\text{ previa}} \\ CC_{A-B} = CC_B + \Delta H_{AB} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} h_A + P_{\min} \\ CC_{A-i} \end{array} \right. \quad (72)$$

Donde:

$CC_{As}$  = alturas piezométrica de consigna del nudo base A luego de la simplificación.

$CC_{A\text{previa}}$  = alturas piezométrica de consigna del nudo base A antes de la simplificación.

$h_A$  = cota del nudo A.

$P_{min}$  = presión mínima a garantizar en los nudos de consumo definida por el usuario.

$CC_{A-i}$  = altura piezométrica de consigna del nudo base A calculada anteriormente en base a otro nudo i simplificado.

La curva de alturas piezométricas de consigna representa información muy útil para el usuario de la red simplificada ya que le permite saber que valores mínimos de presión debe respetar en el modelo reducido si quiere garantizar las presiones mínimas en la red completa original. Esta herramienta brinda gran practicidad a la metodología, aumentando su atractivo para ser utilizada en tareas de operación de red u algoritmos de optimización, entre otras aplicaciones. Este es sin duda una de los puntos sobresalientes de la propuesta que merecen ser destacados.

**b. Escenario 2: flujo desde el nudo C hacia el nudo A**

Este caso se resuelve de forma análoga al Escenario 1 por lo tanto no es necesario explicitar su procedimiento.

**c. Escenario 3: flujo desde el nudo A y nudo C hacia el nudo B**

Tal como se expresó para el cálculo de pérdidas de carga, este escenario es realmente atípico y además la metodología le brinda la opción al usuario de controlarlo indirectamente mediante el algoritmo de validación. Si a pesar de lo anterior fuera necesario calcular la curva de consigna, el procedimiento sería análogo al Escenario 1, con la salvedad de que habrá que calcular además la curva de alturas de consigna del nudo C considerando mantener la presión mínima en B.

**3.3.4 Simplificación de bloques terminales**

La simplificación de bloques terminales (Figura 46) consiste en eliminar un conjunto de nudos y tuberías, mallados o no, vinculados al resto de la red mediante solo un nudo. Esta condición es la que permite que sean tratados como terminales.

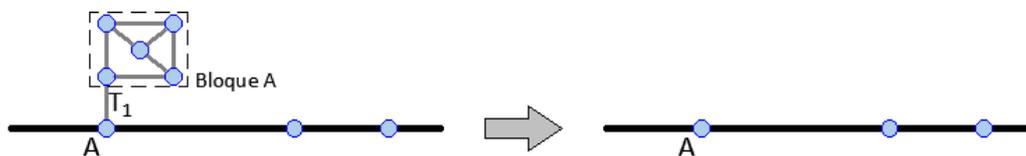


Figura 46 - Ejemplo de simplificación de bloque terminal.

Los ajustes que deben realizarse para minimizar el impacto de la eliminación del bloque en el resto de la RDA son muy similares a los planteados para los ramales terminales y son descritos a continuación.

**3.3.4.1 Relocalización de demanda y patrón de consumo equivalente**

Tomando como ejemplo la Figura 46, la demanda base de los nudos pertenecientes al bloque A debe trasladarse al nudo base A. Por lo tanto, el consumo base del nudo A luego de la simplificación es:

$$Dem_{AS} = Dem_A + \sum_{i=1}^n Dem_i \quad (73)$$

Donde:

$Dem_{AS}$  = demanda base del nudo A luego de la simplificación.

$Dem_A$  = demanda base original del nudo A.

$Dem_i$  = demanda base original de los nudo pertenecientes al bloque terminal A.

$n$  = número de nudos pertenecientes al bloque terminal.

Calculada la demanda total y asignada al nudo base A, resta definir el patrón de demanda que represente tanto al consumo original del nudo A como el de los nudos del bloque. Para ello, se utiliza el caudal horario de la tubería que une al nudo base con el bloque ( $T_1$  según Figura 46).

$$C_{iAS} = \frac{Dem_A \cdot C_{iA} + Q_{Ti}}{Dem_{AS}} \quad (74)$$

Donde:

$C_{iAS}$  = coeficiente de demanda de la hora  $i$  del nudo A luego de la simplificación.

$C_{iB}$  = coeficiente de demanda original de la hora  $i$  del nudo A.

$Q_{Ti}$  = caudal de la tubería  $T_1$  a la hora  $i$ .

De esta manera los consumos de agua se mantienen iguales a los de la red original en cuanto a volumen horario demandado.

### 3.3.4.2 Curva de alturas piezométricas de consigna

Para obtener la curva de alturas de consigna del nudo base se deben analizar las presiones de todos los nudos del bloque a través de una simulación hidráulica con la RDA original. El procedimiento consiste en los siguientes pasos, los cuales se aplican para cada intervalo horario:

1. Identificar el nudo con menor altura piezométrica ( $n_{min}$ ).
2. Obtener la pérdida de carga existente entre el  $n_{min}$  y el nudo base.

$$\Delta H_{A-n_{min}} = H_A - H_{n_{min}} \quad (75)$$

Donde:

$\Delta H_{A-n_{min}}$  = diferencia de alturas entre el nudo A y el nudo  $n_{min}$ .

$H_A$  = altura piezométrica en el nudo A.

$H_{n_{min}}$  = altura piezométrica en el nudo  $n_{min}$ .

3. Calcular la altura piezométrica de consigna del nudo base para cumplir con la altura de consigna del  $n_{min}$ .
4. Definir para cada intervalo la altura de consigna global del nudo base en función de la comparación entre la curva de consigna local calculada con el  $n_{min}$  con la curva previa que posee el nudo base.

$$CC_{As} = \max \begin{cases} CC_{A\text{ previa}} \begin{cases} h_A + P_{\min} \\ CC_{A-i} \end{cases} \\ CC_{A-n\text{ min}} = CC_{n\text{ min}} + \Delta H_{A-n\text{ min}} \end{cases} \quad (76)$$

Donde:

$CC_{As}$  = altura piezométrica de consigna del nudo base A luego de la simplificación.

$CC_{A\text{ previa}}$  = alturas piezométrica de consigna del nudo base A antes de la simplificación.

$h_A$  = cota del nudo A.

$P_{\min}$  = presión mínima a garantizar en los nudos de consumo, definida por el usuario.

$CC_{A-n\text{ min}}$  = altura piezométrica de consigna del nudo A considerando el nudo con mínima altura  $n_{\min}$ .

$CC_{n\text{ min}}$  = altura piezométrica de consigna del nudo  $n_{\min}$ .

$\Delta H_{A-n\text{ min}}$  = diferencia de alturas piezométricas entre el nudo A y el nudo  $n_{\min}$ .

El resultado de aplicar el procedimiento anterior para cada intervalo horario, es la obtención de la curva de alturas piezométricas de consigna que debe poseer el nudo A para garantizar el cumplimiento de presiones mínimas en todas las conexiones pertenecientes al bloque terminal eliminado. Al igual que en las demás operaciones, el usuario cuenta con esta valiosa información para operar con la RDA simplificada y controlar indirectamente las presiones en la red completa original.

### 3.3.5 Simplificación por unión de nudos cercanos

La operación de unión de nudos cercanos consiste en reemplazar, por un único nudo, a un conjunto de conexiones que se encuentran vinculadas mediante tuberías de longitud menor a la máxima admitida por el usuario. Estas tuberías también son eliminadas en el proceso, tal como se muestra a continuación en la Figura 47.

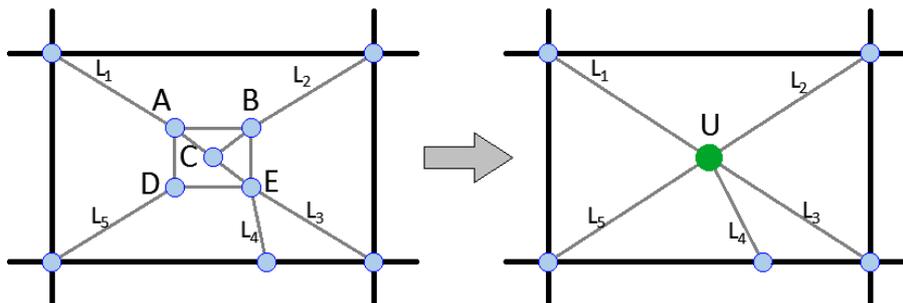


Figura 47 - Ejemplo de simplificación por unión de nudos cercanos.

Al igual que en los casos anteriores, se deben ejecutar una serie de ajustes y cálculos complementarios para minimizar el impacto que tiene esta reducción en relación a la red original.

### 3.3.5.1 Cota

La cota del nudo de unión U se define como el promedio de las cotas de las conexiones unidas. Cabe recordar que el usuario tiene la facultad de decidir la diferencia de cota máxima admisible entre los nudos cercanos para que se realice la unión.

$$h_U = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n} \quad (77)$$

Donde:

$h_U$  = cota del nudo de unión U.

$h_i$  = cota de los nudos cercanos a unir.

$n$  = número de nudos a unir.

### 3.3.5.2 Relocalización de demanda y patrón de consumo equivalente

Tomando como ejemplo la Figura 47, la demanda base de los nudos cercanos debe asignarse al nuevo nudo U. Por lo tanto, el consumo base del nudo U es:

$$Dem_U = \sum_{i=1}^n Dem_i \quad (78)$$

Donde:

$Dem_U$  = demanda base del nudo U.

$Dem_i$  = demanda base de los nudos cercanos a unir.

$n$  = número de nudos cercanos a unir.

Calculada la demanda total y asignada al nudo unión U, resta definir el patrón de demanda que represente el consumo horario de todas las conexiones fusionadas. Para ello, se combinan las demandas y los coeficientes de cada uno y se forma un nuevo patrón:

$$C_{jU} = \frac{\sum_{i=1}^n Dem_i \cdot C_{ji}}{Dem_U} \quad (79)$$

Donde:

$C_{jU}$  = coeficiente de demanda de la hora j del nudo U.

$C_{ji}$  = coeficiente de demanda de la hora j del nudo i.

De esta manera los consumos de agua se mantienen iguales a los de la red original en cuanto a volumen horario demandado.

### 3.3.5.3 Curva de alturas piezométricas de consigna

La curva de alturas piezométricas de consigna del nudo de unión será la más exigente de las curvas de todos los nudos a unir. Puesto que las conexiones se encuentran relativamente cerca, si se cumple la consigna para el nudo más desfavorable se cumplirá para los demás también. Este análisis se hace para cada intervalo horario.

$$CC_U = \max [CC_i]_{i=1}^n \quad (80)$$

Donde:

$CC_U$  = altura piezométrica de consigna del nudo de unión.

$CC_i$  = altura piezométrica de consigna de los nudos cercanos a unir.

Con esta información el usuario de la red simplificada logra conocer la altura mínima que debe tener el nudo de unión para garantizar las alturas de consigna en todos los nudos unidos.

### 3.4 Diagrama completo de la metodología propuesta.

A modo de resumen de este capítulo, se presenta en la página siguiente la Figura 48 que muestra el diagrama de flujo completo de la metodología desarrollada. Como se puede observar, el punto de partida de la metodología es la red original y la Etapa 0, en la cual se define el tipo de simplificación que se desea ejecutar y los valores de parámetros asociados. Es importante aclarar que en esta etapa deben fijarse también las características de las simulaciones hidráulicas que se ejecutan al inicio y durante el proceso de reducción. Unidades de caudal, ecuación de pérdidas de carga, tiempo de simulación son algunas de estos principales parámetros que el usuario debe definir al comenzar con la esqueletización.

El diagrama de la Figura 48 también permite apreciar que no es un proceso de aplicación única sino que se trata de un procedimiento iterativo, en el cual se aplican sucesivamente las operaciones de simplificación hasta obtener la menor expresión posible de la RDA original. Esta es una particularidad de la metodología propuesta, que se distingue de muchas otras existentes que plantean una única aplicación de técnicas de reducción.

Por último, cabe destacar la información de salida presente en todas las operaciones de eliminación de nudos (la excepción es la unión de tuberías paralelas, en la cual no se elimina ningún nudo.) Estas curvas de consigna de alturas piezométricas ayudan al usuario de la red simplificada a operarla considerando las necesidades hidráulicas de la red original.

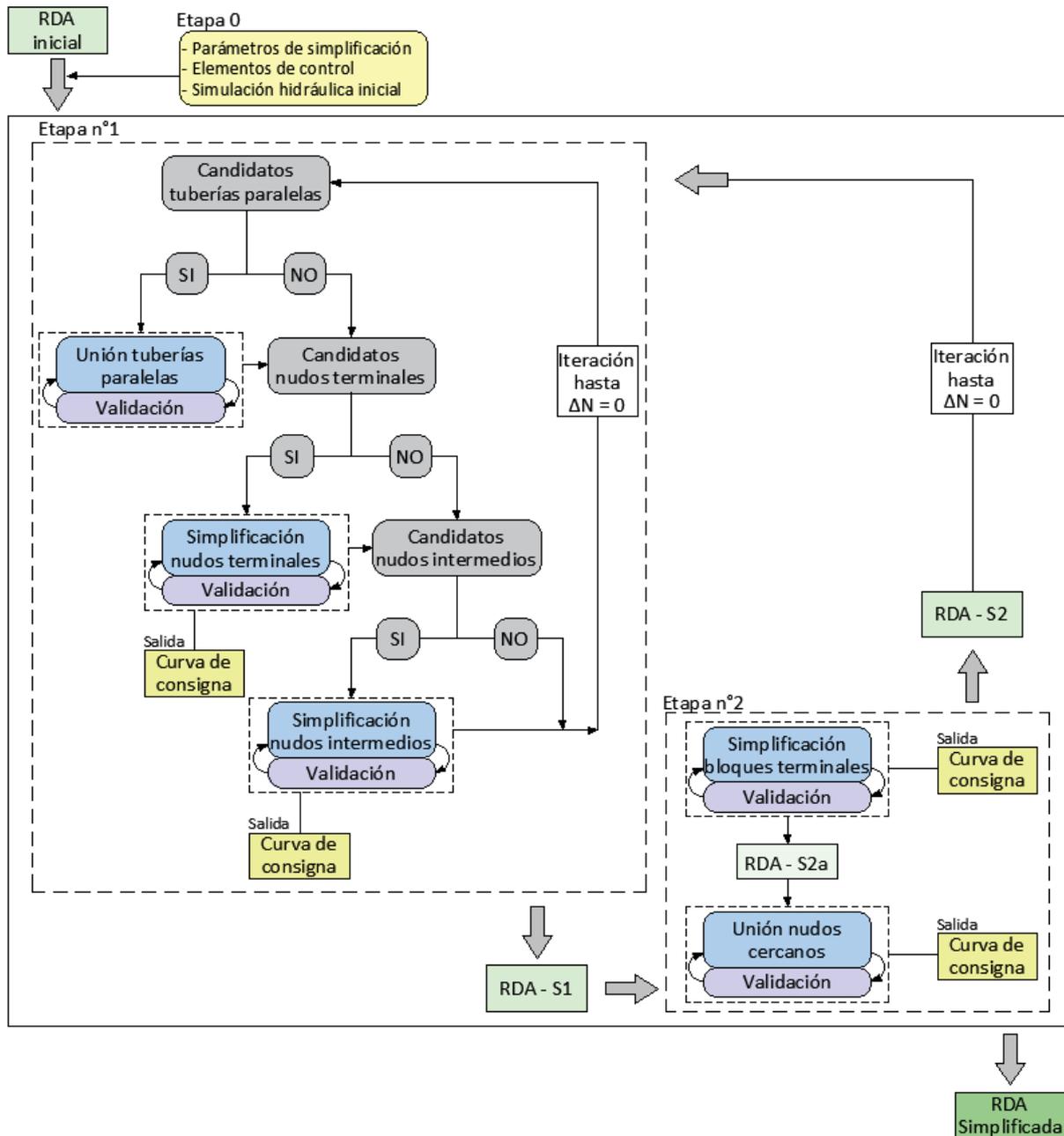


Figura 48 - Diagrama completo de metodología de simplificación propuesta.

## 4. HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA LA APLICACIÓN AUTOMATIZADA DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

### 4.1 Objetivo y características de la herramienta

La metodología presentada en el capítulo anterior implica la aplicación sucesiva de las operaciones de simplificación. La cantidad de veces que se ejecuta el algoritmo depende directamente del tamaño de la red, lo cual implica que puede realizarse cientos o miles de veces. En base a lo anterior, resulta indispensable automatizar los procedimientos para aumentar la aplicabilidad y practicidad del método. Este es el objetivo perseguido con el desarrollo de la herramienta informática “Toolkit HS” que se describe a continuación.

Como se comentó en el apartado 2.1.3, la Toolkit de Epanet brinda la posibilidad de programar instrucciones a ser directamente ejecutadas por el software. La escritura del código puede realizarse en distintos lenguajes y plataformas informáticas. En este caso particular, se ha utilizado el lenguaje Visual Basic .Net y el software Visual Studio 2010®.

Cabe destacar que la herramienta ha sido desarrollada para resolver la metodología propuesta bajo condiciones particulares de cálculo, por lo que aún no cuenta con la robustez necesaria para ser utilizada de forma extensiva.

### 4.2 Interfaz de la herramienta

La interfaz de la herramienta se divide en tres módulos individuales para facilitar la utilización. Las características de cada uno así como su aspecto se presentan en los apartados siguientes.

#### 4.2.1 Datos de partida

El primer módulo, mostrado en la Figura 49 corresponde a los datos de partida. En él, el usuario debe abrir el archivo EPANET que contiene la red de distribución de agua a simplificar. Es importante aclarar que el programa lee las características de cálculo, tiempo de simulación y demás opciones de hidráulica y tiempo directamente del archivo, por lo que estas deben estar correctamente definidas en el mismo.

En primera instancia, el programa hará una lectura completa de todos los componentes de la red, definiendo así sus características topológicas. Como información resultante se presenta en pantalla el número de nudos, número de tuberías, ratio nudos/tuberías, entre otros.

En segundo término, el software ejecuta una simulación hidráulica para conocer los valores correspondientes a presiones y nudos de la red. La información de salida de este proceso corresponde a las características de la demanda base y a los valores máximos de presión y caudal. Adicionalmente, se muestran las unidades de caudal y ecuación de pérdidas que utiliza el archivo EPANET cargado. Estos parámetros son muy importantes puesto que definen el sistema de unidades bajo el cual el fichero está configurado (sistema métrico o convencional).

En el visor de eventos, a la derecha de la pantalla, se muestran las operaciones que realiza el software. En este caso, simplemente se trata de apertura del fichero, lectura de la red y simulación hidráulica inicial.

TOOLKIT HS

DATOS DE PARTIDA

**Abrir fichero EPANET**

**Topología**

- N° nudos
- N° tuberías
- Ratio nudos/tuberías
- N° embalses
- N° depósitos
- N° bombas
- N° válvulas
- Longitud total de tuberías
- Elevación media de los nudos

**Hidráulica**

- Demanda base total
- N° patrones de demanda
- Altura máxima media
- Caudal máximo horario
- Unidades de caudal
- Ecuación de pérdidas

Apertura de fichero realizada.

-----

Lectura de fichero realizada.

-----

Simulacion hidraulica inicial realizada.

-----

SIMPLIFICACIÓN

RESULTADOS

Figura 49 - Módulo I de la herramienta informática de simplificación.

#### 4.2.2 Simplificación

El segundo módulo de la Toolkit HS corresponde a la operación de simplificación, tal como muestra la Figura 50.

Como paso inicial, el usuario debe ingresar en esta parte todos los parámetros necesarios para definir como se hará la simplificación, tal como fue explicado en el capítulo anterior. Luego, debe seleccionar la operación de esqueletización que desee ejecutar, para lo cual hay dos opciones de trabajo:

- a. Simplificación completa: el programa ejecuta el algoritmo de simplificación completo siguiendo la secuencia esquematizada en la Figura 48 del apartado 3.4.
- b. Simplificación por operación: seleccionando los diferentes botones (p. ej. Tuberías paralelas, Nudos intermedios, etc.), el usuario puede ejecutar operaciones de simplificación por separado siguiendo su propia secuencia de trabajo. La red reducida resultante de una operación es el punto de partida para la operación siguiente. No obstante, para la validación, siempre se consideran los valores de presión y caudal de los elementos de control de la red original.

TOOLKIT HS

DATOS DE PARTIDA	<b>Parámetros de simplificación</b>		Simulación hidráulica inicial realizada. Candidatos paralelas realizado Fusión de paralelas realizada. Candidatos Terminales finalizado. Simplificación de nudos terminales realizada. No hay mas ramales terminales simplificables Candidatos Intermedios finalizado. Simplificación de nudos intermedios realizada. No hay mas nudos intermedios simplificables Simulación hidráulica final realizada.
SIMPLIFICACIÓN	- N° elementos de control	<input type="text" value="26"/>	
RESULTADOS	- Diferencia de diámetro admisible %	<input type="text" value="30"/>	
	- Diferencia de rugosidad admisible (%)	<input type="text" value="50"/>	
	- Demanda base máxima	<input type="text" value="3"/>	
	- Longitud máxima admisible	<input type="text" value="100"/>	
	- Diferencia de cota máxima admisible	<input type="text" value="2"/>	
	- Indicador de eficiencia I	<input type="text" value="NS"/>	
	- Valor mínimo para caudales	<input type="text" value="0.95"/>	
	- Valor mínimo para presiones	<input type="text" value="0.95"/>	
	- Indicador de eficiencia II	<input type="text" value="Er max"/>	
	- Diferencia de caudal admisible (%)	<input type="text" value="10"/>	
	- Diferencia de presión admisible (%)	<input type="text" value="10"/>	
	- Presión mínima de consigna	<input type="text" value="20"/>	
	<b>Operaciones de simplificación</b>		
	<input type="button" value="Simplificación completa"/>	<input type="button" value="Tuberías paralelas"/>	<input type="button" value="Nudos terminales"/>
	<input type="button" value="Nudos intermedios"/>	<input type="button" value="Bloques terminales"/>	<input type="button" value="Nudos cercanos"/>

Figura 50 - Módulo II de la herramienta informática de simplificación.

Durante el desarrollo de la esqueletización, el visor de eventos de la derecha en la Figura 50 permite conocer los procesos que se van ejecutando. Lo interesante del módulo es que permite realizar diferentes combinaciones de parámetros y operaciones de simplificación de forma sencilla, brindando al usuario información útil para la toma de decisiones en cada operación.

#### 4.2.3 Resultados

Finalmente, una vez ejecutadas las operaciones de reducción, se llega al módulo de resultados que muestra la Figura 51, el cual está dividido en dos secciones. Primero, se presentan las principales características de la red simplificada, que permiten valorar la reducción realizada. Por un lado están los parámetros topológicos y por otra parte los valores resultantes de la simulación hidráulica final en la RDA esqueletizada. En segundo lugar, se encuentra la sección de archivos de salida. Los resultados que se pueden obtener del programa son los presentados a continuación:

- a. Fichero EPANET con la red simplificada resultante, con la cual el usuario puede comenzar a operar.
- b. Archivo de curvas de alturas piezométricas de consigna de todos los nudos involucrados en la simplificación, útil para conocer las presiones que deben tener los nudos en la red reducida para garantizar la presión mínima en la red original completa.

- c. Listado de tuberías paralelas, nudos terminales y nudos intermedios candidatos cuya simplificación ha sido valorada. Esto permite por un lado analizar la evolución de la cantidad de nudos y líneas candidatos en cada ciclo de simplificación y, por otra parte, poseer el registro de todos los elementos que han sido tenidos en cuenta en el procedimiento.
- d. Listado del valor mínimo que los indicadores de eficiencia adoptan en cada operación de simplificación. Al estar ordenada cronológicamente, permite observar la variación de los indicadores a lo largo del proceso de reducción. A su vez, este registro resulta muy útil para identificar si la razón por la cual un elemento no ha sido eliminado es un bajo valor de indicador de eficiencia.
- e. Archivo de presiones y caudales de los elementos de control, tanto de la red original como de la red simplificada. Esta información es valiosa para calcular manualmente otros indicadores de eficiencia y analizar sus resultados.
- f. Archivo de presiones y caudales de todos los elementos presentes a ambas redes (original y simplificada). Con estos datos, el usuario puede analizar la eficiencia global de la simplificación, a su vez que estudiar algún elemento particular de interés.

Como se puede apreciar, la herramienta brinda la posibilidad de realizar el tipo de simplificación que el usuario desee y otorga a este la información de salida necesaria para evaluar la reducción y operar la red resultante.

TOOLKIT HS

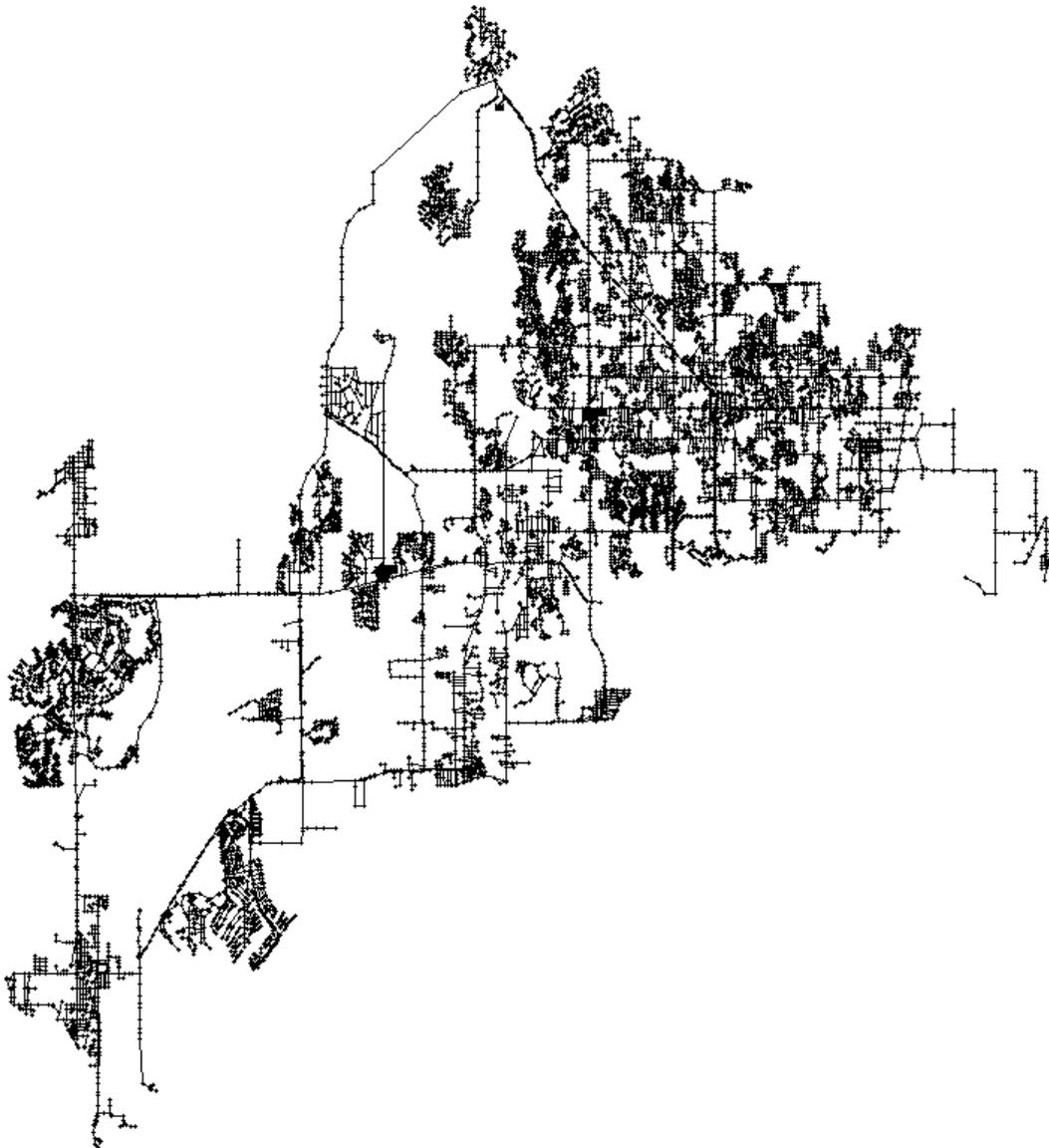
DATOS DE PARTIDA	Resultados de la simplificación			
SIMPLIFICACIÓN	Topología		Hidráulica	
RESULTADOS	- N° nudos	2943	- Demanda base total	1065
	- N° tuberías	4271	- N° patrones de demanda	152
	- Ratio nudos/tuberías	0,69	- Altura máxima media	72,95
	- N° embalses	2	- Caudal máximo horario	1358,62
	- N° depósitos	2	- Caudal medio horario	1052,38
	- N° bombas	4	- Valor mínimo índice I	0,951
	- N° válvulas	5	- Valor máximo índice II	8,5
	- Longitud total de tuberías	1125536	- Nudos bajo consigna (%)	100
	- Elevación media de los nudos	15,8	- Líneas bajo consigna (%)	68
	Archivos de salida			
	<b>Fichero EPANET simplificado</b>	Registro de presiones en nudos	Registro de caudales líneas	Alturas de consigna
		Registro de índice I	Registro de índice II	Registro de simplificaciones

Figura 51 - Módulo III de la herramienta informática de simplificación.

## 5. CASO DE ESTUDIO

### 5.1 Presentación del caso de estudio

Con el objetivo de presentar un ejemplo de aplicación de la metodología propuesta, se explica en este capítulo la simplificación de la red BWSN-2. Esta red fue utilizada como caso de estudio en la denominada “Battle of the Water Sensor Networks” (BWSN), la cual se llevó a cabo en el 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium celebrado en Cincinnati, Ohio, en agosto de 2006 (Ostfeld et al., 2008). La red BWSN-2 fue usada en esta “batalla” entre especialistas hidráulicos para estudiar la localización óptima de sensores de calidad de agua orientados a detectar, de manera rápida, la presencia de contaminantes ocasionados por un eventual ataque terrorista. La Figura 52 muestra la red mencionada y la Tabla 11 resume sus características principales.



*Figura 52 - Red BWSN-2 utilizada como caso de estudio.*

Tabla 11 – Características topológicas e hidráulicas de la red de estudio BWSN - 2

Nº	Concepto	Cantidad
		Red inicial (i)
1	Nº nudos	12523 ud
2	Nº tuberías	14822 ud
3	Ratio nudos/tuberías	84.5 %
4	Nº embalses	2 ud
5	Nº depósitos	2 ud
6	Nº bombas	4 ud
7	Nº válvulas	5 ud
8	Longitud total de tuberías	1843 km
9	Volumen total de las tuberías	101168 m <sup>3</sup>
10	Elevación media de nudos	15.3 m
11	Altura máxima media en nudos	73.4 mca
12	Demanda base total	1065 lps
13	Nº patrones de consumo	5 ud
14	Caudal máximo horario	1359 lps

Se presenta además, en la Figura 53, el mapa de cotas de los nudos de la red que permite apreciar su altimetría.

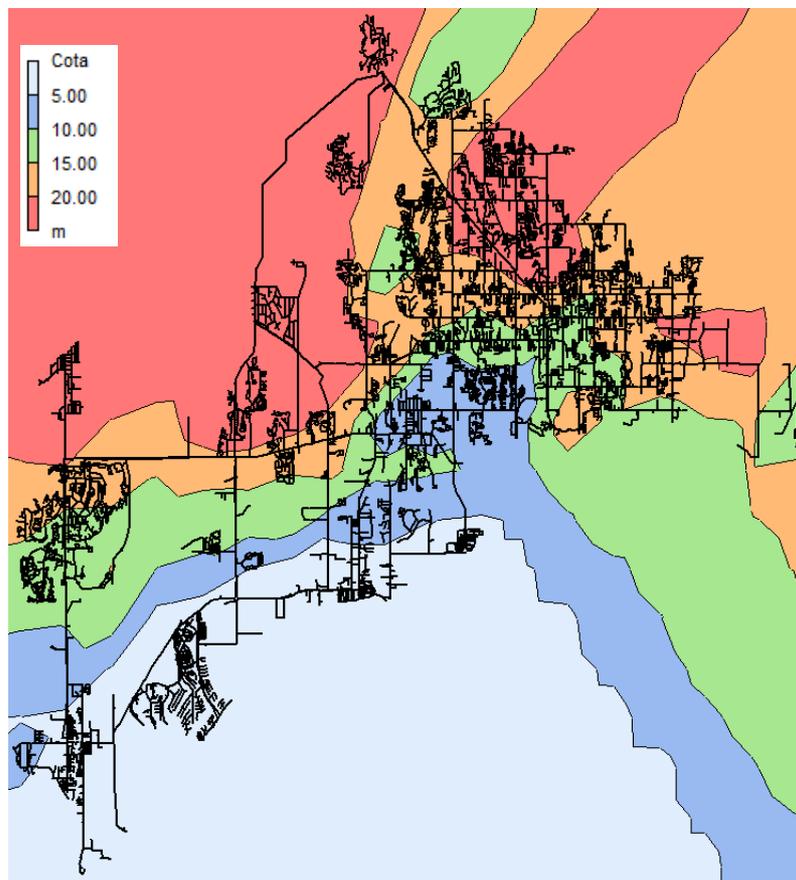


Figura 53 - Mapa de contorno de cotas de nudo.

## 5.2 Descripción del proceso realizado

La simplificación de la red BWSN-2 se realiza aplicando la metodología completa descrita en el apartado 3, es decir, la Etapa n°1 y n°2, empleando la herramienta informática desarrollada. En cuanto a los parámetros hidráulicos y los propios del procedimiento, se define lo siguiente:

- El periodo definido para las simulaciones hidráulicas inicial y de validación es de 24 horas.
- En relación a la ecuación de pérdida de energía, se emplea la de Hazen – Williams.
- Respecto a la validación dual de las operaciones de reducción, se utiliza por un lado el coeficiente Nash-Sutcliffe y por otra parte los criterios porcentuales de variación de caudal y presión en líneas y nudos de control respectivamente ( $E_{max}$ :  $\Delta Q_{adm}$  y  $\Delta P_{adm}$ ).
- El resto de los parámetros se define luego de realizar el análisis de sensibilidad presentando en el apartado 5.3 siguiente.

## 5.3 Análisis de sensibilidad para definición de parámetros de simplificación

La metodología propuesta posee características que le brindan la posibilidad de adaptarse a las preferencias del usuario. Al ser un método flexible, deben definirse como punto de partida los parámetros que regirán la simplificación. Para ello, es recomendable realizar un análisis de sensibilidad que permita valorar el efecto de cada uno, aportando información que ayude a definir la combinación óptima de estos valores.

A continuación se presenta un análisis de la influencia que poseen los principales parámetros en el resultado de simplificación obtenido aplicando solo la 1ª Etapa de simplificación, por ser esta la más determinante. Cabe destacar que el número de combinaciones posibles variando todos los parámetros es muy elevado, por lo que se han analizado solo aquellas consideradas más relevantes. Es importante aclarar también que si bien ayudan a comprender el patrón de comportamiento general, los resultados obtenidos son válidos para el caso de estudio analizado y podrían ser diferentes para redes con otra configuración topológica e hidráulica.

### 5.3.1 Variación de diferencias de rugosidad máximas admisibles

Como se explicó en el apartado 3.2.4.3, para que dos tuberías en serie puedan unirse deben cumplir con ciertos requisitos topológicos, de los cuales la diferencia admisible de diámetro ( $\Delta \emptyset_{adm}$ ) y rugosidad ( $\Delta Rug_{adm}$ ) son definidos por el usuario.

Para estudiar la influencia del  $\Delta Rug$  admisible, se consideran cinco valores que permiten evaluar el efecto de esta variable. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 12 y en las Figura 54 y Figura 55. Como se puede apreciar, el parámetro  $\Delta Rug_{adm}$  ejerce influencia para valores mayores al 5% y menores al 100%. Este límite máximo resulta lógico ya que un valor de  $\Delta Rug_{adm} = 100\%$  significa anular por completo el criterio de rugosidad. La razón de esto radica en la forma en que se calcula esta diferencia porcentual (ecuación (17)), con la cual resulta evidente que nunca se alcanzará el valor del 100%.

$$\Delta rug_{adm} = \left( \frac{r_1 - r_2}{r_1} \right) \cdot 100 \text{ con } r_1 > r_2 \quad (17)$$

Tabla 12 - Análisis de la influencia del  $\Delta R_{ug}$  admisible.

Red inicial		Parámetros							Red simplificada	
Nº nudos	Nº líneas	nº controles	Min Nash	$\Delta Q_{adm}$	$\Delta P_{adm}$	$\Delta \phi_{adm}$	$\Delta R_{ugadm}$	Dem <sub>max</sub> (lps)	Nº nudos	Nº líneas
12523	14822	26	0.80	10%	10%	50%	1%	6	3281	4672
		26	0.80	10%	10%	50%	5%	6	3281	4672
		26	0.80	10%	10%	50%	25%	6	3273	4660
		26	0.80	10%	10%	50%	50%	6	3090	4441
		26	0.80	10%	10%	50%	100%	6	2486	3736

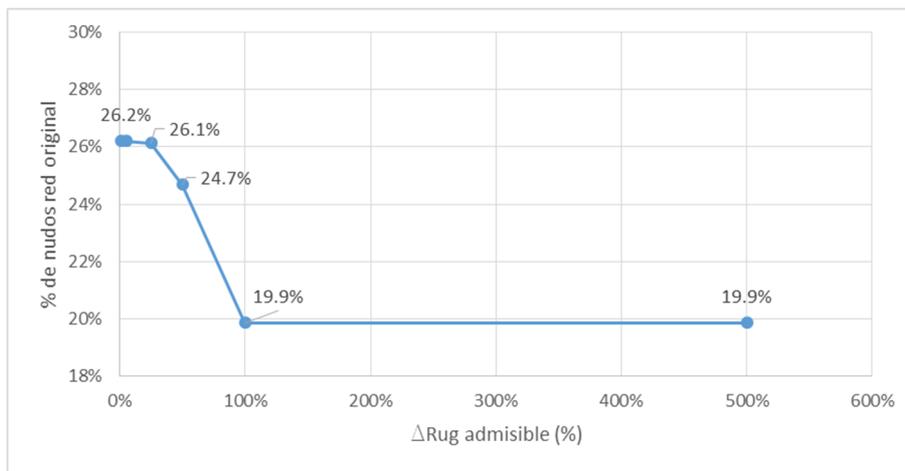


Figura 54 - Relación entre el  $\Delta R_{ug}$  admisible y el % de nudos resultante respecto a la red original.

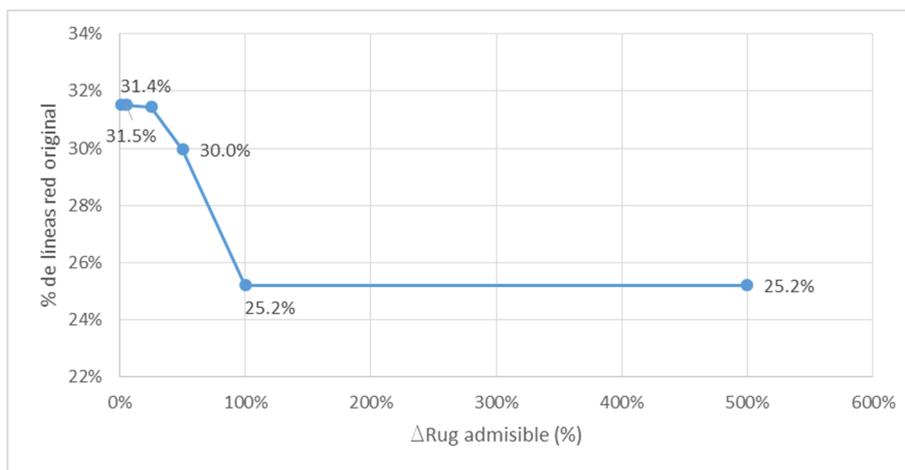


Figura 55 - Relación entre el  $\Delta R_{ug}$  admisible y el % de líneas resultante respecto a la red original.

### 5.3.2 Variación de diferencias de diámetro máximas admisibles

Con respecto al efecto del valor  $\Delta \phi$  admisible, se evaluaron siete casos desde 1% a 80%. La conclusión obtenida es que este parámetro ejerce influencia en la simplificación cuando su valor es bajo y por tanto más restrictivo. A partir del 50% ya no se aprecian cambios considerables en el tamaño final de la red simplificada. La Tabla 13 resume lo comentado y los datos porcentuales son representados en las Figura 56 y Figura 57.

Tabla 13 - Análisis de la influencia del  $\Delta\phi$  admisible.

Red inicial		Parámetros							Red simplificada	
Nº nudos	Nº líneas	nº controles	Min Nash	$\Delta Q_{adm}$	$\Delta P_{adm}$	$\Delta\phi_{adm}$	$\Delta R_{ugadm}$	Dem <sub>max</sub> (lps)	Nº nudos	Nº líneas
12523	14822	26	0.80	10%	10%	1%	100%	6	3477	4906
		26	0.80	10%	10%	10%	100%	6	3437	4855
		26	0.80	10%	10%	30%	100%	6	2919	4247
		26	0.80	10%	10%	50%	100%	6	2486	3740
		26	0.80	10%	10%	60%	100%	6	2457	3702
		26	0.80	10%	10%	70%	100%	6	2416	3653
		26	0.80	10%	10%	80%	100%	6	2410	3647

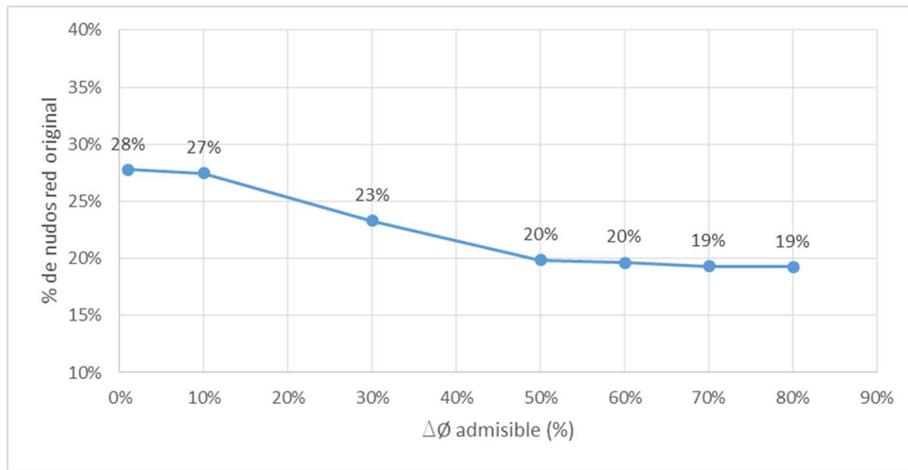


Figura 56 - Relación entre el  $\Delta\phi$  admisible y el % de nudos resultante respecto a la red original.

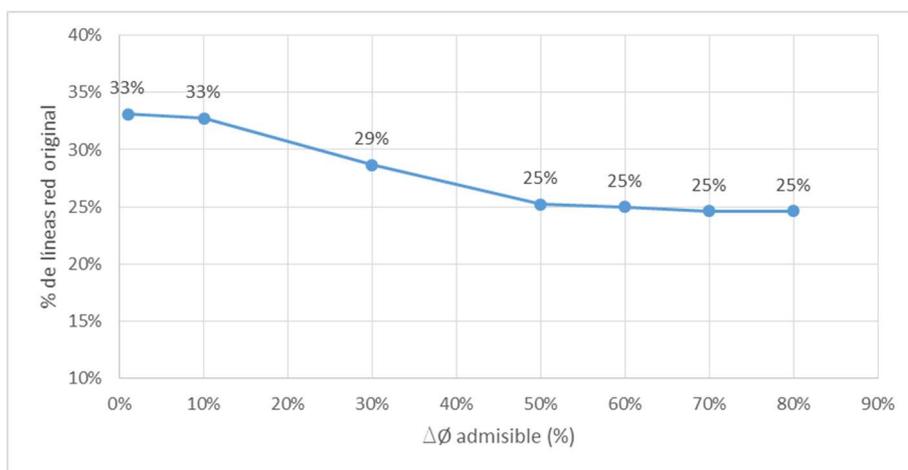


Figura 57 - Relación entre el  $\Delta\phi$  admisible y el % de líneas resultante respecto a la red original.

### 5.3.3 Variación de demanda base máxima admisible

Otro parámetro a definir por el usuario en cuanto a los nudos intermedios es la demanda base máxima que estos pueden tener para ser candidatos a simplificación. La siguiente Tabla 14 resume los cuatro casos analizados para cuantificar la influencia de este parámetro, la cual es de gran importancia ya que limita de forma directa el conjunto de nudos que se pueden eliminar. Como se puede apreciar, a partir de 1 lps el efecto generado en la esqueletización disminuye, debido a que el caso de estudio posee en su mayoría demandas base de bajo valor. En las gráficas de Figura 58 y Figura 59 se visualizan los resultados porcentuales.

Tabla 14 - Análisis de la influencia de la  $Dem_{max}$  admisible.

Red inicial		Parámetros							Red simplificada	
Nº nudos	Nº líneas	nº controles	Min Nash	$\Delta Q_{adm}$	$\Delta P_{adm}$	$\Delta \phi_{adm}$	$\Delta Rug_{adm}$	$Dem_{max}$ (lps)	Nº nudos	Nº líneas
12523	14822	26	0.80	10%	10%	50%	100%	0.01	7715	9488
		26	0.80	10%	10%	50%	100%	0.1	5904	7612
		26	0.80	10%	10%	50%	100%	1	2774	4072
		26	0.80	10%	10%	50%	100%	6	2486	3740

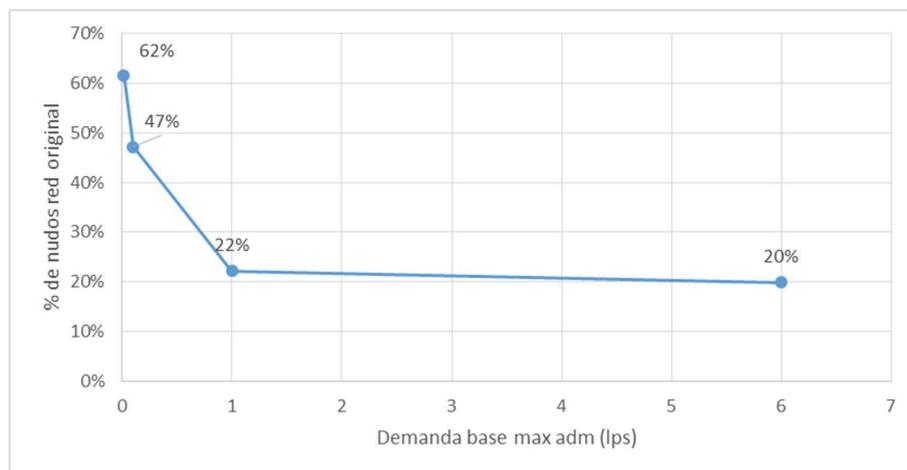


Figura 58 - Relación entre la  $Dem_{max}$  admisible y el % de nudos resultante respecto a la red original.

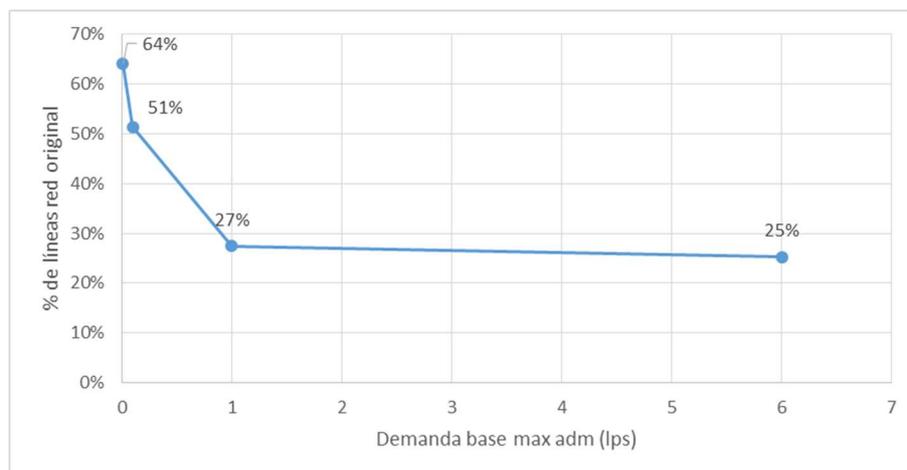


Figura 59 - Relación entre la  $Dem_{max}$  admisible y el % de líneas resultante respecto a la red original.

### 5.3.4 Variación de cantidad de nudos y líneas de control

La cantidad y localización de elementos de control es una variable que el usuario puede definir y que tiene especial utilidad cuándo desea garantizar la precisión en una zona determinada de la RDA. En este caso, sin embargo, el análisis de sensibilidad de este parámetro se realizó seleccionando los nudos y líneas de control repartidos de forma uniforme a lo largo de toda la red.

Como se puede apreciar en la Tabla 15, la influencia de la cantidad de controles solo toma cierta importancia a partir de 52 pares de elementos (cada par se compone de un nudo y una línea). Interesa destacar que este comportamiento está íntimamente relacionado a los parámetros de eficiencia  $\Delta Q_{adm}$  y  $\Delta P_{adm}$ . Una variación de estos generará otra tendencia en la relación entre la cantidad de controles y el tamaño final de la red simplificada. En las gráficas de las Figura 60 y Figura 61 se visualizan los resultados porcentuales.

Tabla 15 - Análisis de la influencia de la cantidad de elementos de control.

Red inicial		Parámetros							Red simplificada	
Nº nudos	Nº líneas	nº controles	Min Nash	$\Delta Q_{adm}$	$\Delta P_{adm}$	$\Delta \phi_{adm}$	$\Delta R_{ugadm}$	Dem <sub>max</sub> (lps)	Nº nudos	Nº líneas
12523	14822	10	0.80	10%	10%	50%	100%	6	2472	3723
		15	0.80	10%	10%	50%	100%	6	2476	3727
		20	0.80	10%	10%	50%	100%	6	2482	3733
		26	0.80	10%	10%	50%	100%	6	2486	3740
		52	0.80	10%	10%	50%	100%	6	2495	3746
		78	0.80	10%	10%	50%	100%	6	2704	3967

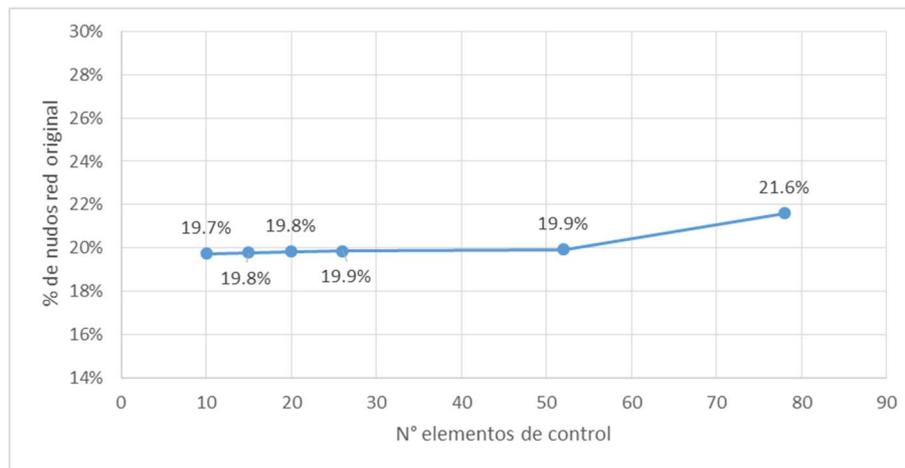


Figura 60 - Relación entre el nº de elementos de control y el % de nudos resultante respecto a la red original.

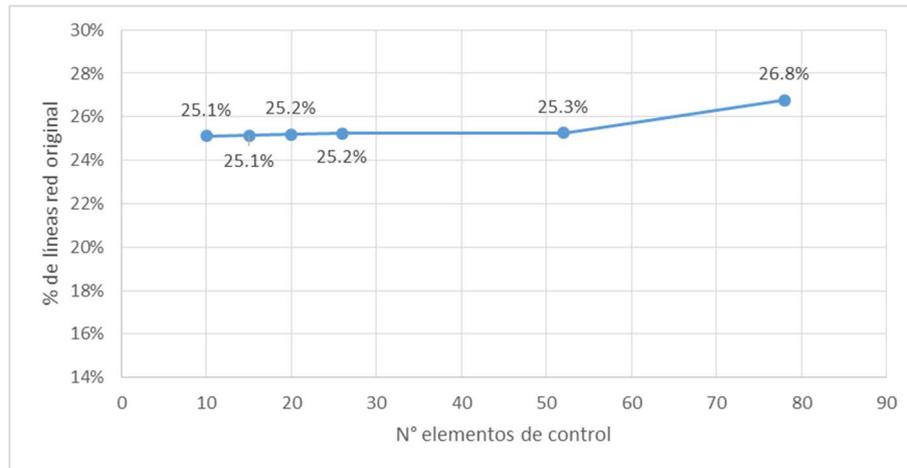


Figura 61 - Relación entre el nº de elementos de control y el % de líneas resultante respecto a la red original.

### 5.3.5 Variación de diferencia de caudal y presión máxima admisible

Estos parámetros son a priori de gran relevancia, puesto que le permiten al usuario cuantificar de forma directa la calidad a obtener en los resultados en la red simplificada. Para hacer más sencillo el análisis, se realizan seis casos utilizando el mismo  $\Delta\%$  tanto para caudales ( $\Delta Q_{adm}$ ) como para presiones ( $\Delta P_{adm}$ ). Esto se justifica con el hecho de que en general es el valor de  $\Delta Q_{adm}$  el que limita la esqueletización, con lo que el  $\Delta P_{adm}$  pasa a tener un rol secundario.

Las cantidades de nudos y líneas obtenidas para cada escenario se resumen en la Tabla 16 y se grafican en forma porcentual en la Figura 62 y Figura 63. Se puede apreciar que, para este conjunto de valores de parámetros, el  $\Delta Q_{adm}$  y  $\Delta P_{adm}$  no generan gran variación en el tamaño de la red final simplificada. Es importante destacar que en todos los casos presentados, el parámetro limitante para el avance de la simplificación ha sido el  $\Delta Q_{adm}$ , dejando incluso sin influencia al valor mínimo de Nash.

La conclusión que se deriva del análisis de estos casos es que el 80% de la simplificación de la red (12523 – 2510 = 10013 nudos equivalentes al 80% de la RDA inicial) puede realizarse sin exceder el 2% de diferencia de caudal ( $\Delta Q$ ) y presión ( $\Delta P$ ) con la red original medido en los elementos de control. Como ya se ha mencionado, esta conclusión es solo válida para este caso de estudio y con los valores de parámetros presentados.

Tabla 16 - Análisis de la influencia del  $\Delta Q$  y  $\Delta P$  admisible.

Red inicial		Parámetros							Red simplificada	
Nº nudos	Nº líneas	nº controles	Min Nash	$\Delta Q_{adm}$	$\Delta P_{adm}$	$\Delta \phi_{adm}$	$\Delta R_{ug_{adm}}$	Dem <sub>max</sub> (lps)	Nº nudos	Nº líneas
12523	14822	26	0.80	2%	2%	50%	100%	6	2510	3763
		26	0.80	5%	5%	50%	100%	6	2500	3751
		26	0.80	10%	10%	50%	100%	6	2486	3740
		26	0.80	15%	15%	50%	100%	6	2486	3737
		26	0.80	20%	20%	50%	100%	6	2484	3736
		26	0.80	25%	25%	50%	100%	6	2484	3736

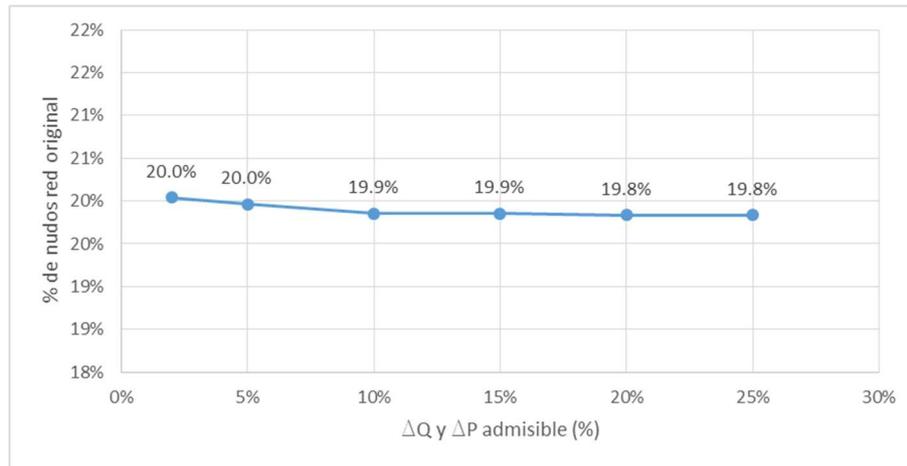


Figura 62 - Relación entre el  $\Delta Q$  y  $\Delta P$  admisible y el % de nodos resultante respecto a la red original.

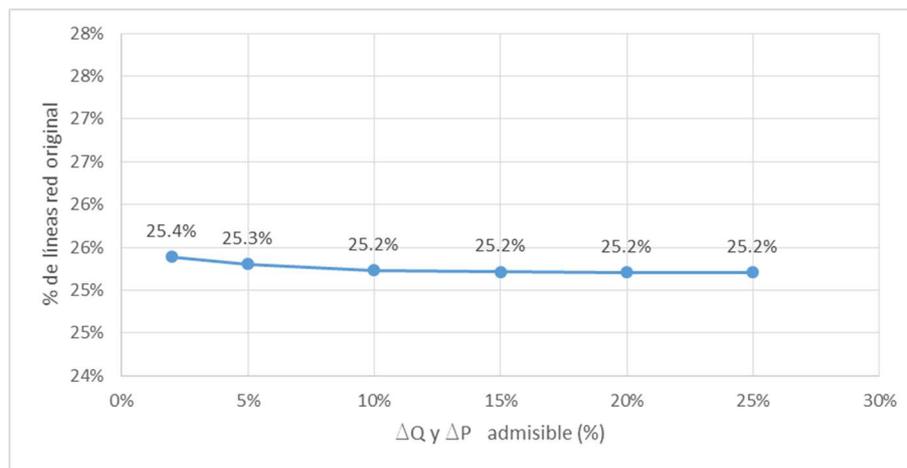


Figura 63 - Relación entre el  $\Delta Q$  y  $\Delta P$  admisible y el % de líneas resultante respecto a la red original.

### 5.3.6 Variación del valor mínimo admisible del índice de Nash-Sutcliffe

Como se comentó en apartados anteriores, el coeficiente de NS mide la eficiencia de la simplificación en términos de semejanza de series de presiones y caudales, de los elementos de control, entre la red original y la red simplificada. La Tabla 17 presenta los valores obtenidos para los escenarios analizados. Como se puede apreciar, se han adoptado valores de  $\Delta Q_{adm}$  y  $\Delta P_{adm}$  muy poco restrictivos para lograr apreciar la real influencia del valor admisible del NS.

Tabla 17 - Análisis de la influencia del valor mínimo admisible del índice NS.

Red inicial		Parámetros							Red simplificada	
Nº nodos	Nº líneas	nº controles	Min Nash	$\Delta Q_{adm}$	$\Delta P_{adm}$	$\Delta \phi_{adm}$	$\Delta R_{ug_{adm}}$	Dem <sub>max</sub> (lps)	Nº nodos	Nº líneas
12523	14822	26	<b>0.60</b>	200%	200%	50%	100%	6	2483	3734
		26	<b>0.95</b>	200%	200%	50%	100%	6	2515	3763
		26	<b>0.98</b>	200%	200%	50%	100%	6	3094	4440
		26	<b>0.99</b>	200%	200%	50%	100%	6	3110	4451

La Figura 64 y Figura 65 permiten evaluar el tamaño resultante de la red en función del valor mínimo de NS admisible. Cabe destacar que se ha empleado el mismo NS para presiones y para caudales. Del análisis de las gráficas se puede concluir que la amplitud de influencia de este parámetro es muy acotada (0.95 – 1). Por debajo de dicho valor mínimo, no genera prácticamente efectos en el nivel de simplificación al que se puede arribar. Evidentemente, estas conclusiones corresponden a este caso particular de red y combinación de parámetros.

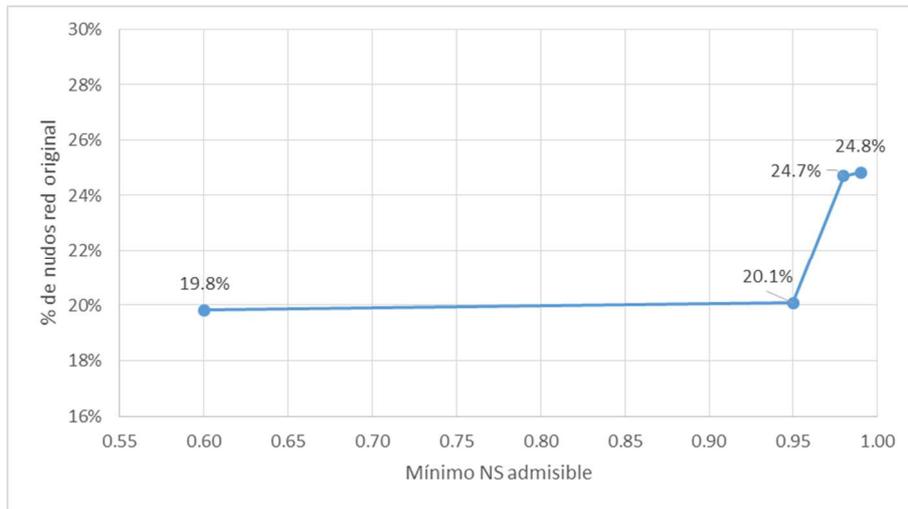


Figura 64 - Relación entre el NS mínimo admisible y el % de nodos resultante respecto a la red original.

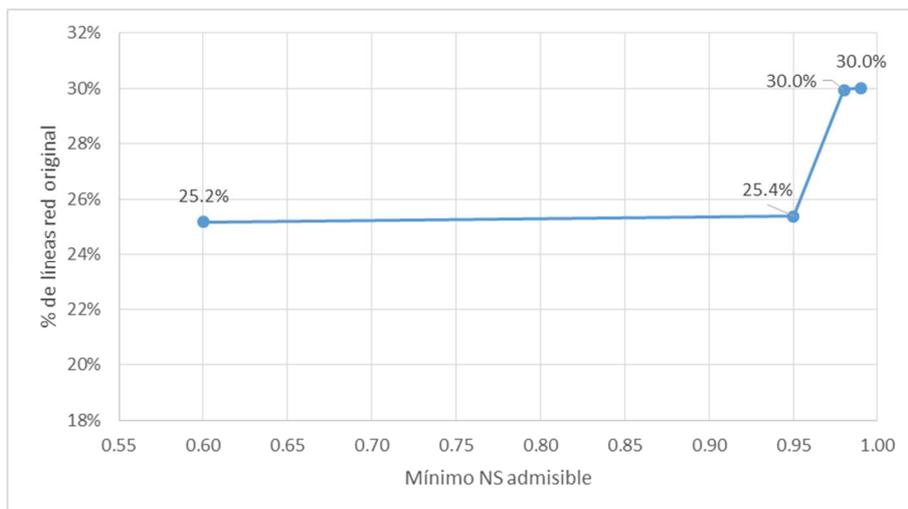


Figura 65 - Relación entre el NS mínimo admisible y el % de líneas resultante respecto a la red original.

## 5.4 Definición de parámetros de simplificación para el caso de estudio

Los casos utilizados para realizar el análisis de sensibilidad explicado en el apartado anterior son solo algunos de los tantos que se llevaron a cabo para entender el funcionamiento de la metodología en el caso de estudio. Para complementar este análisis, la Tabla 18 siguiente presenta los resultados obtenidos en algunos escenarios planteados con valores de parámetros extremos, elegidos bajo la premisa de obtener una RDA reducida hidráulicamente útil.

Tabla 18 – Casos de valores extremos de parámetros.

Red inicial		Parámetros							Red simplificada	
Nº nudos	Nº líneas	nº controles	Min Nash	$\Delta Q_{adm}$	$\Delta P_{adm}$	$\Delta \phi_{adm}$	$\Delta Rug_{adm}$	Dem <sub>max</sub>	Nº nudos	Nº líneas
12523	14288	26	0.6	30%	30%	80%	100%	6	2408	3645
		26	0.98	5%	5%	1%	1%	0.1	6155	7882
$\Delta =$									<b>3747</b>	<b>4237</b>
$\Delta / total =$									<b>30%</b>	<b>30%</b>

Los resultados anteriores son de gran utilidad puesto que permiten cuantificar la cantidad de nudos y líneas simplificables que dependen directamente de los parámetros que el usuario escoja. En este caso, a primera vista podría mal interpretarse que un 30% no es un valor elevado y por tanto la elección de los parámetros no requiere demasiada consideración. Sin embargo, si se traduce ese porcentaje a nudos o líneas, la cantidad si se convierte en relevante. Si la RDA simplificada fuera a utilizarse como base para algoritmos de optimización de diámetros de tuberías, por ejemplo, el coste computacional de analizar 4237 conductos de más no resulta para nada despreciable.

En base a lo desarrollado hasta aquí, se definen los siguientes valores de parámetros para realizar proceso de simplificación completo de la red (Etapa nº1 y nº2):

Tabla 19 - Parámetros de simplificación definidos para el caso de estudio.

Función	Operación	Parámetro	Valor
Selección de candidatos	Simplificación nudos intermedios	Diferencia de diámetro admisible $\Delta \phi_{adm}$	50%
		Diferencia de rugosidad admisible $\Delta Rug_{adm}$	100%
		Demanda base máxima Dem <sub>max</sub>	1.5 lps
	Unión nudos cercanos	Longitud máxima admisible	100 m
Diferencia de cota máxima admisible $\Delta h_{max}$		2 m	
Validación de la simplificación	Validación	Número de elementos de control	26
		Mínimo índice Nash - Suttcliffe para caudales	0.80
		Mínimo índice Nash - Suttcliffe para presiones	0.80
		Diferencia de caudal admisible $\Delta Q_{adm}$	10%
		Diferencia de presión admisible $\Delta P_{adm}$	10%

Respecto a los elementos de control, cabe recordar que el usuario de la metodología tiene la potestad de elegir los nudos y líneas que se utilizan para el proceso de validación, como se explicó en el apartado 3.2.3. En este caso de estudio, se decide seleccionar estos elementos formando pares nudo – línea contiguos. De esta manera, se logra controlar la precisión de la simplificación tanto en cuanto a presiones (a través del nudo de control) como en cuanto a caudales (mediante la línea de control).

Los elementos de control se ubican principalmente en embalses, depósitos e intersecciones de tuberías de gran diámetro. La Figura 66 presenta la red de estudio en la cual se han coloreado las tuberías de acuerdo a su diámetro, para poder visualizar fácilmente las mallas y tuberías principales. Las letras rojas indican el nombre identificativo de cada par de control nudo-línea y el círculo negro marca la posición del mismo en la red. A modo de ejemplo, en la misma figura se presenta en detalle el par de elementos F, en donde se puede apreciar que están localizados en la intersección de dos tuberías principales y que el nudo y la línea son contiguos, tal como se mencionó anteriormente.

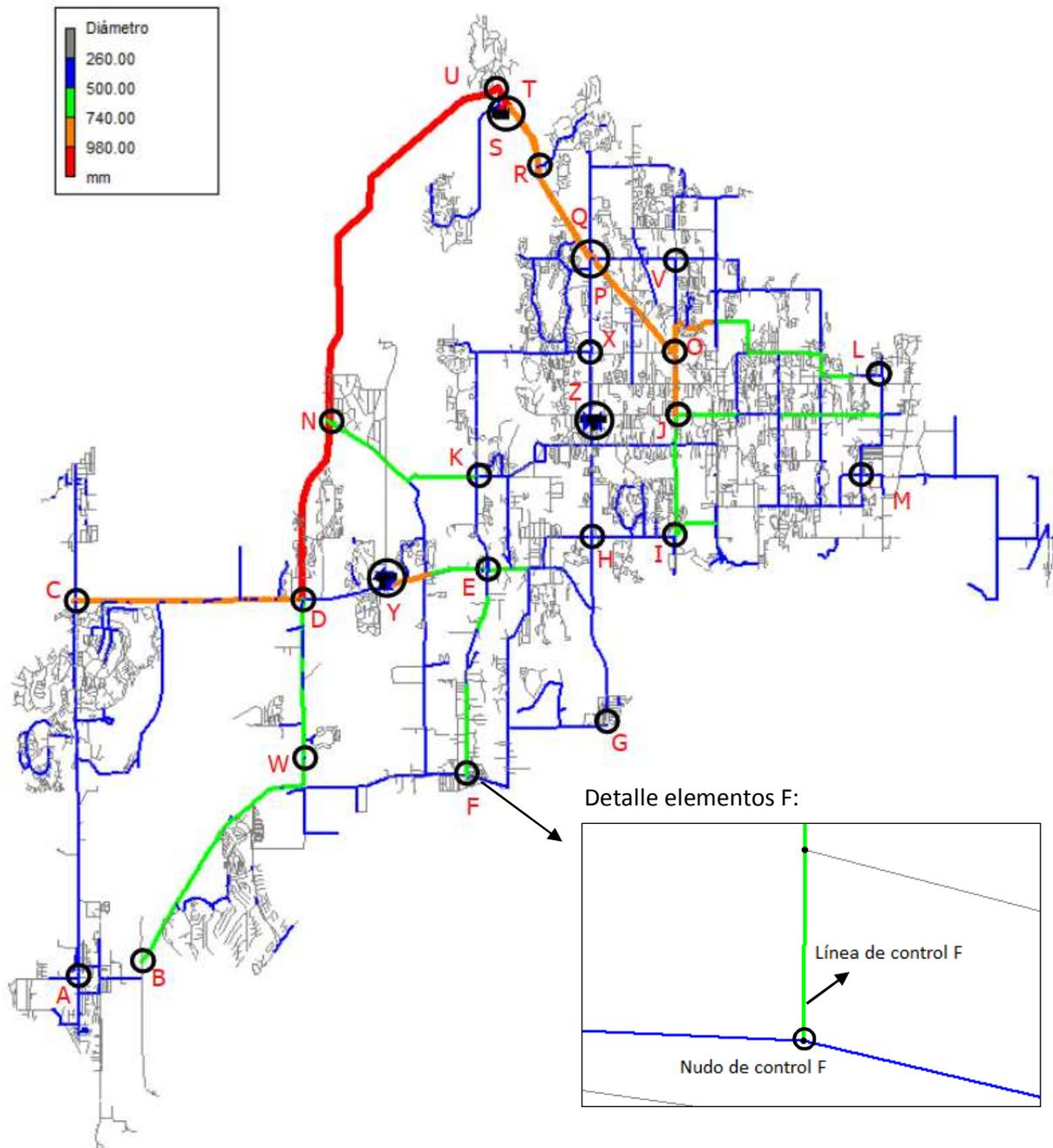


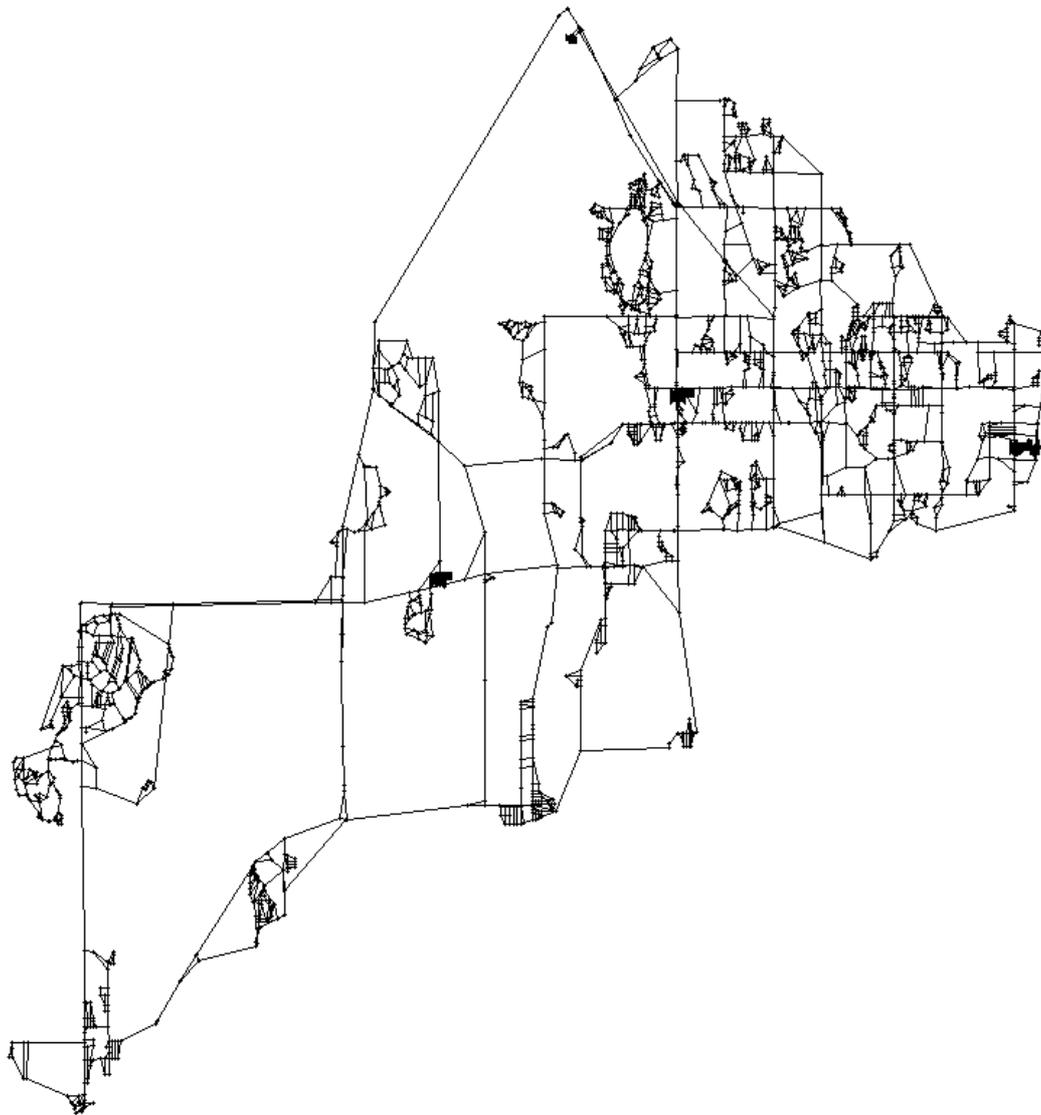
Figura 66 - Localización de elementos de control en la red de estudio BWSN-2.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de la simplificación del caso de estudio explicada anteriormente. En primera instancia se analiza el aspecto topológico de la red y en segundo término la eficiencia de la esqueletización en cuanto a funcionamiento hidráulico.

### 6.1 Topología de la red simplificada

Lo primero que debe analizarse para valorar la eficiencia de la simplificación son las variaciones producidas en la topología de la RDA original. Para ello, se muestra en la Figura 67 la red simplificada, la cual también es mostrada en la Figura 68 junto a la red original para una mejor comparación.



*Figura 67 - Red BWSN-2 simplificada con método propuesto.*



Figura 68 - Red BWSN-2 original (izquierda) y simplificada (derecha).

La Tabla 20 presenta la comparación de las características topológicas más relevantes de ambas redes. Se puede apreciar que la reducción es realmente considerable, representando el 17% y 22% de los nudos y tuberías iniciales respectivamente. Por otra parte, tal como fue establecido al definir las operaciones de simplificación, los nudos que no son conexiones (p.ej. embalses) y las líneas que no son tuberías (p.ej. bombas) quedan fuera del alcance del algoritmo y por tanto sus cantidades no sufren alteraciones.

Tabla 20 - Comparación de características topológicas de la RDA original y simplificada.

N°	Concepto	Cantidades		
		Red inicial (i)	Red simplificada (s)	Ratio (s/i)
1	N° nudos	12523 ud	2117 ud	17%
2	N° tuberías	14822 ud	3228 ud	22%
3	Ratio nudos/tuberías	84.5 %	65.6 %	78%
4	N° embalses	2 ud	2 ud	100%
5	N° depósitos	2 ud	2 ud	100%
6	N° bombas	4 ud	4 ud	100%
7	N° válvulas	5 ud	5 ud	100%
8	Longitud total de tuberías	1843 km	989 km	54%
9	Volumen total de las tuberías	101168 m <sup>3</sup>	80634 m <sup>3</sup>	80%
10	Elevación media de nudos	15.3 m	15.8 m	103%

Con respecto a la longitud total de tuberías, se percibe que se han reducido prácticamente a la mitad. Esto es producto principalmente de la eliminación de nudos y bloques terminales y en menor medida de la fusión de paralelas y unión de puntos cercanos. Como se verá en el apartado siguiente, esto no sugiere un problema en cuanto a la hidráulica de la red. Sin embargo, sí representa una limitación para

el análisis de calidad de agua. Cabe aclarar, sin embargo, que tal como se definió al inicio del documento la valoración cualitativa del fluido quedaba fuera del alcance de la metodología propuesta.

En relación a la elevación media de los nudos, se observa que la diferencia es prácticamente nula. Esto se debe a que a nivel general no es una red que presente grandes desniveles entre sus conexiones.

La Figura 69 presenta ambas redes (original y simplificada) con las líneas coloreadas en función de la magnitud de sus diámetros. Se puede observar que los ramales principales se mantienen en la esqueletización, y que la reducción se ejecuta fundamentalmente en las redes subsidiarias. Esto está vinculado con el valor de los parámetros y la ubicación de los elementos de control definidos para el caso de estudio.

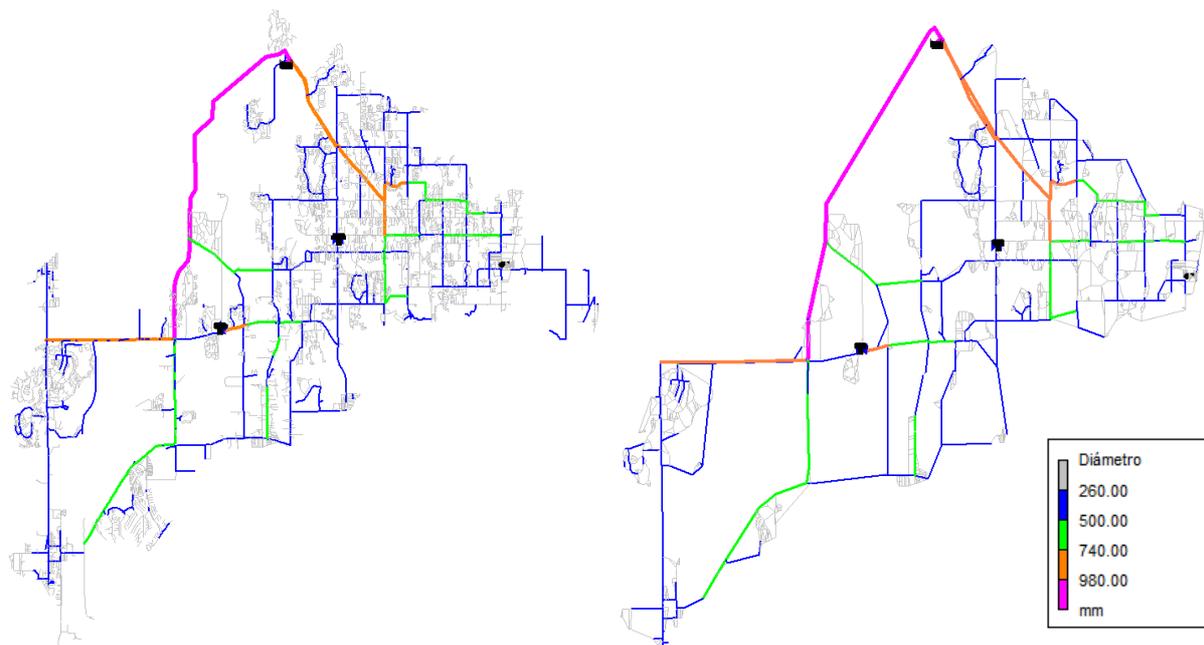


Figura 69 - Distinción de diámetros de tuberías en red original y simplificada.

Finalmente, para comprender el proceso de simplificación, resulta interesante acercar la mirada en algún sector testigo y observar los cambios que sufre la red en las diferentes etapas de reducción.

- Red original (Figura 70).

Cantidad de elementos:

- 100 nudos.
- 135 líneas.

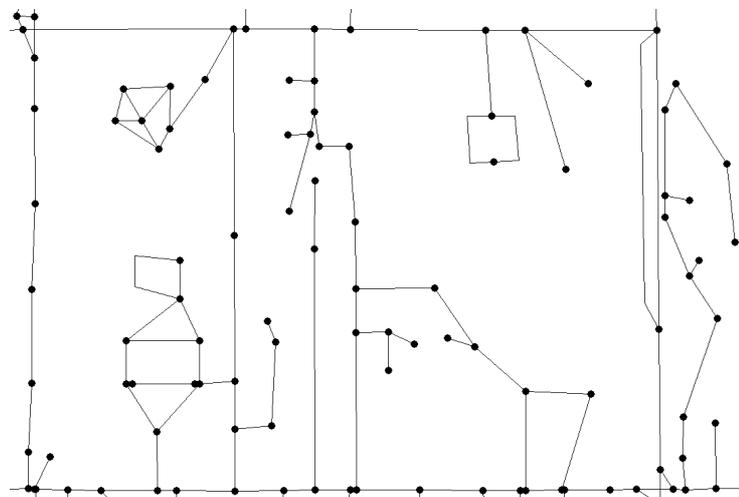
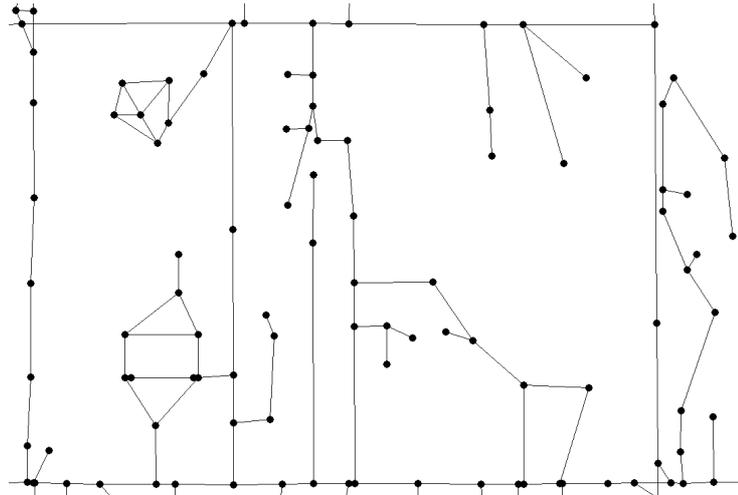


Figura 70 - Red original.

- Simplificación de tuberías paralelas (inicial) (Figura 71).

Cantidad de elementos:

- 100 nudos (100% red original).
- 132 líneas (97% red original)

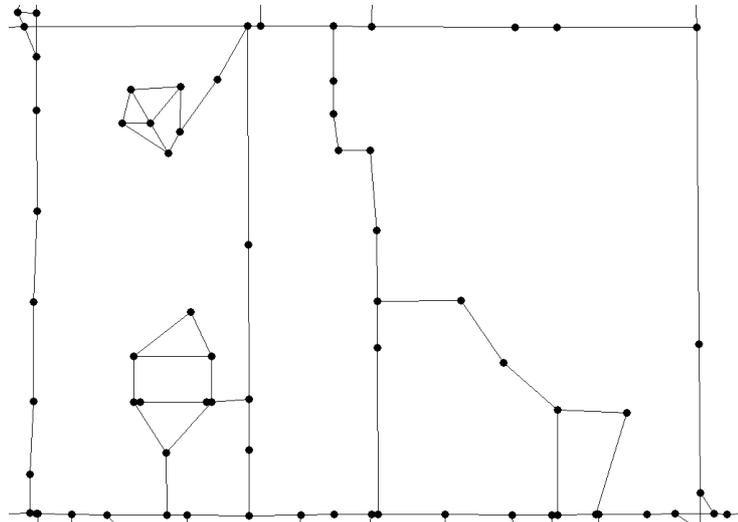


*Figura 71 - Red con tuberías paralelas simplificadas.*

- Simplificación de nudos terminales (Figura 72).

Cantidad de elementos:

- 68 nudos (68% red original).
- 100 líneas (74% red original).

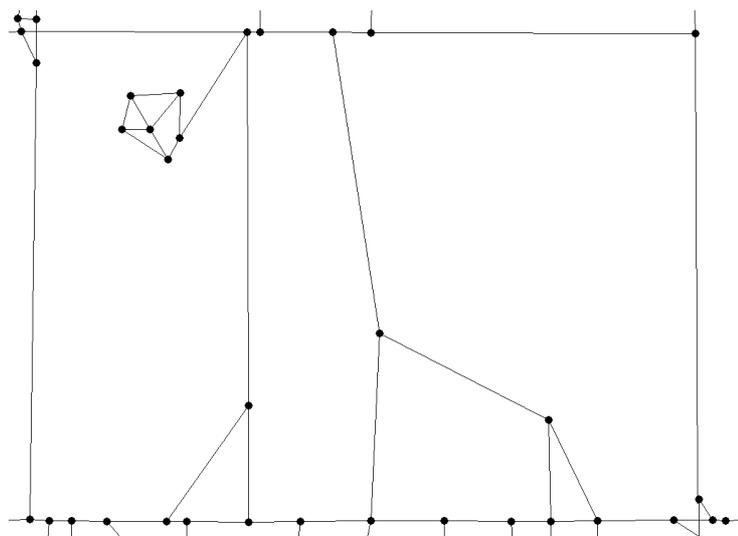


*Figura 72 - Red con nudos terminales simplificados.*

- Simplificación de nudos intermedios (combinado con paralelas) (Figura 73).

Cantidad de elementos:

- 36 nudos (36% red original).
- 65 líneas (48% red original).



*Figura 73 - Red con nudos intermedios simplificados.*

- Simplificación de bloques terminales (Figura 74).

Cantidad de elementos:

- 29 nudos (29% red original).
- 54 líneas (40% red original).

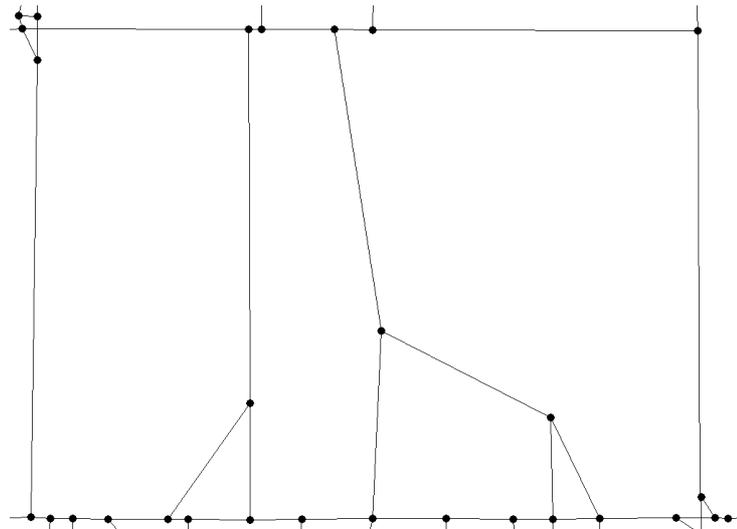


Figura 74 - Red con bloques terminales simplificados.

- Unión de nudos cercanos (Figura 75).

Cantidad de elementos:

- 15 nudos (15% red original).
- 38 líneas (28% red original).

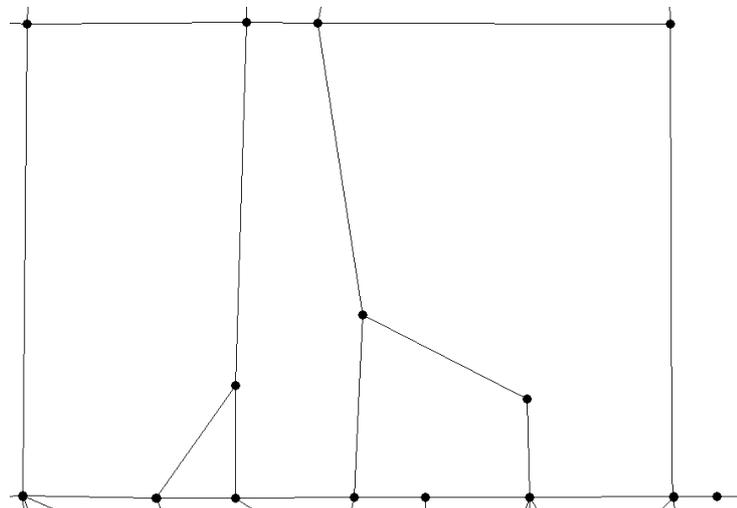


Figura 75 - Red con nudos cercanos simplificados.

Para concluir este apartado, se presenta en la Tabla 21 el detalle por operación de la reducción que sufre la red original completa hasta llegar a la red simplificada final. Como se puede observar, en este caso particular de estudio los procesos de mayor impacto son en primer lugar la eliminación de nudos intermedios y en segunda posición la eliminación de nudos terminales.

Tabla 21 - Resumen de la reducción de red por etapas de simplificación.

		Nudos		Líneas	
<b>Red original</b>		<b>12523</b>	<b>100%</b>	<b>14822</b>	<b>100%</b>
Operación	Unión paralelas	0	0%	-498.5	-3%
	Nudos terminales	-3843	-31%	-3843	-26%
	Nudos intermedios	-6197	-49%	-6748	-46%
	Bloques terminales	-165	-1%	-256	-2%
	Nudos cercanos	-201	-2%	-249	-2%
<b>Red simplificada</b>		<b>2117</b>	<b>17%</b>	<b>3228</b>	<b>22%</b>

## 6.2 Precisión hidráulica de la simplificación

En este apartado se intenta valorar con qué precisión la red simplificada logra representar a la red original en relación al análisis hidráulico. Para comenzar con este estudio, se presenta la Tabla 22 que contiene la variación de algunos de los parámetros más relevantes.

*Tabla 22 - Comparación de características hidráulicas de la RDA original y simplificada.*

N°	Concepto	Cantidades		
		Red inicial (i)	Red simplificada (s)	Ratio (s/i)
1	Demanda base total	1065 lps	1065 lps	100%
2	N° patrones de consumo	5 ud	180 ud	3600%
3	Altura máxima media en nudos	73.4 mca	73.3 mca	100%
4	Caudal máximo horario	1359 lps	1359 lps	100%

### 6.2.1 Demanda base

La **demanda base** total se mantiene inalterada puesto que, como se explicó en el apartado 3.3, en cada reducción se relocalizan a los nudos contiguos. En esa misma operación, se calculan nuevos patrones de demanda, que combinan el consumo horario del nudo base con el nudo a ser eliminado. Es por ello que la cantidad de patrones de consumo cambia de solo 5 a 180 unidades.

En base a lo anterior se puede afirmar que metodología de simplificación no genera cambios cuantitativos en la demanda de la red. Los cambios cualitativos ocasionados por la relocalización de los consumos base, se evalúan de forma indirecta mediante el análisis de alturas y caudales.

### 6.2.2 Alturas piezométricas

Lo siguiente a analizar son las **alturas piezométricas** de los nudos de la red reducida. Cabe recordar que para que una operación de simplificación sea aceptada debe superar el módulo de validación, el cual está definido por valores mínimos del coeficiente de Nash-Sutcliffe (0.80) y criterios de diferencias porcentuales de caudal ( $\Delta Q_{adm} = 10\%$ ) y presión ( $\Delta P_{adm} = 10\%$ ) que deben cumplir los elementos de control. Para cumplimentar el análisis, en este caso se calculan también los demás indicadores de eficiencia mencionados en el apartado 2.2.5. Los resultados se resumen en la Tabla 23.

Como se puede apreciar, los resultados son más que satisfactorios. En ningún caso los indicadores calculados en base a los valores de altura piezométrica en los nudos de control se acercan a los mínimos impuestos para el caso de estudio.

Tabla 23 - Análisis de variación de alturas piezométricas en los nudos de control.

Nudo de control	$\Delta H\%_{\max}$ Error máx relativo	NS Nash-Sutcliffe	d Willmott	EF Eficacia del método	$\rho_{xy}$ Coef. Pearson	$\rho_{xy}^2$ Coef. de redet.	C Índice de desempeño
A	0.1%	0.998	0.999	0.998	1.000	1.000	0.999
B	0.1%	0.998	0.999	0.998	1.000	1.000	0.999
C	0.2%	0.998	1.000	0.998	1.000	1.000	0.999
D	0.2%	0.998	0.999	0.998	1.000	1.000	0.999
E	0.3%	0.991	0.998	0.991	1.000	1.000	0.998
F	0.2%	0.991	0.998	0.991	1.000	1.000	0.998
G	0.2%	0.990	0.998	0.990	1.000	1.000	0.997
H	0.3%	0.990	0.998	0.990	1.000	1.000	0.997
I	0.2%	0.992	0.998	0.992	1.000	1.000	0.998
J	0.2%	0.995	0.999	0.995	1.000	1.000	0.999
K	0.3%	0.992	0.998	0.992	1.000	1.000	0.998
L	0.2%	0.991	0.998	0.991	1.000	1.000	0.998
M	0.2%	0.991	0.998	0.991	1.000	1.000	0.998
N	0.2%	0.998	0.999	0.998	1.000	1.000	0.999
O	0.2%	0.997	0.999	0.997	1.000	1.000	0.999
P	0.1%	0.999	1.000	0.999	1.000	1.000	1.000
Q	0.1%	0.999	1.000	0.999	1.000	1.000	1.000
R	0.1%	0.999	1.000	0.999	1.000	1.000	1.000
S	0.1%	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
T	0.1%	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
U	0.1%	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
V	0.2%	0.997	0.999	0.997	1.000	1.000	0.999
W	0.2%	0.996	0.999	0.996	1.000	1.000	0.999
X	0.2%	0.993	0.998	0.993	1.000	1.000	0.998
Y	0.3%	0.996	0.999	0.996	1.000	1.000	0.999
Z	0.2%	0.992	0.992	0.992	1.000	1.000	0.992
	<b>0.3%</b>	<b>0.990</b>	<b>0.992</b>	<b>0.990</b>	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>	<b>0.992</b>
	<b>Valor máximo</b>	<b>Valores mínimos</b>					

Más allá de la gran precisión alcanzada en los puntos de control, resulta interesante conocer cómo se comporta la red simplificada en su totalidad. Para ello, se comparan las alturas piezométricas horarias de todos los nudos de la red esqueletizada con los mismos nudos de la red original. La comparación se realiza para cada intervalo horario, y luego dichos valores son promediados para obtener la diferencia media de altura piezométrica de cada nudo presente en ambas redes (81).

$$\Delta H_i = \frac{\sum_{j=1}^{24} |h_j^O - h_j^S|}{24} \quad (81)$$

Donde:

$i$  = nudo de las redes, cuyo valor varía de 1 a 2117.

$\Delta H_i$  = diferencia absoluta de altura piezométrica media del nudo  $i$  presente en ambas redes, en metros de columna de agua (mca).

$j$  = intervalo horario.

$h_j^o$  = altura piezométrica del nudo  $i$  de la red original a la hora  $j$ .

$h_j^s$  = altura piezométrica del nudo  $i$  de la red simplificada a la hora  $j$ .

Los resultados se agrupan por intervalos en la Tabla 24 y se grafican en la Figura 76. Se aprecia que el 100 % de los puntos de la red simplificada poseen una diferencia menor a 1 mca con respecto a la red original, lo cual da cuenta de la gran precisión de la metodología en este aspecto.

Tabla 24 - Diferencias absolutas de alturas piezométricas de todos los nudos de la red simplificada.

$\Delta H_i$ (mca)	Cantidad de nudos	% del total de nudos	% acumulado
< 0.1	1668	84.6%	84.6%
0.1 - 0.5	300	15.2%	99.8%
0.5 - 1.0	3	0.2%	100.0%

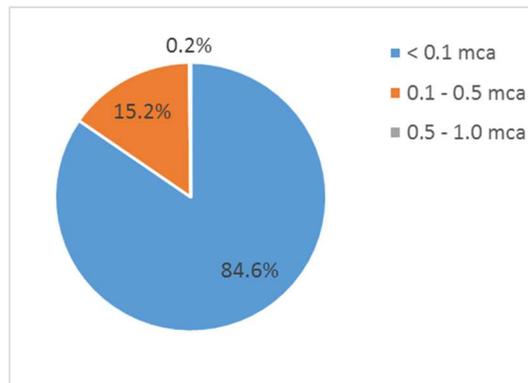


Figura 76 - Distribución de nudos según  $\Delta H_i$  (mca).

Para finalizar el análisis de la precisión en cuanto a alturas piezométricas, se calcula que porcentaje del total de nudos tiene una diferencia menor a la de consigna ( $\Delta P_{adm} = 10\%$ ) preestablecida. Esta es una manera de evaluar la influencia que tienen los elementos de control para lograr que se cumplan, en el resto de la red, los requisitos de precisión impuestos sobre ellos. Las diferencias relativas medias de cada nudo se obtienen según la ecuación (82).

$$\Delta H_{i-rel} = \frac{\sum_{j=1}^{24} \left| \frac{h_j^o - h_j^s}{h_j^o} \cdot 100 \right|}{24} \quad (82)$$

Donde:

$\Delta H_{i-rel}$  = diferencia relativa de altura piezométrica media del nudo  $i$  presente en ambas redes, en mca.

Como se puede percibir en la Tabla 25, los resultados son óptimos: el 100% de los nudos cumple con la consigna predefinida para los elementos de control.

Tabla 25 - Diferencias relativas de alturas piezométricas de todos los nudos de la red simplificada.

$\Delta h_{i-rel}$ (mca)	Cantidad de nudos	% del total de nudos	% acumulado
< 5%	1971	100.0%	100.0%

### 6.2.3 Caudales

Por último, resta evaluar el comportamiento de la simplificación en cuanto a **caudales en las tuberías**. Para ello, se ejecuta un análisis similar al realizado para las alturas piezométricas. El primer paso es completar el estudio calculando los demás indicadores de eficiencia, tal como muestra la Tabla 26.

Tabla 26 - Análisis de variación de caudales en las líneas de control.

Línea de control	$\Delta Q\%_{max}$ Error máx relativo	NS Nash-Sutcliffe	d Willmott	EF Eficacia del método	pxy Coef. Pearson	pxy ^2 Coef. de redet.	C Índice de desempeño
A	2.3%	0.996	0.999	0.996	1.000	1.000	0.999
B	5.8%	0.918	0.981	0.918	0.997	0.995	0.978
C	0.7%	0.992	0.998	0.992	1.000	1.000	0.998
D	1.5%	0.992	0.998	0.992	1.000	1.000	0.998
E	10.0%	0.932	0.954	0.933	0.982	0.964	0.937
F	7.3%	0.999	1.000	0.999	1.000	0.999	0.999
G	5.7%	0.970	0.992	0.970	0.995	0.990	0.987
H	1.0%	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
I	4.2%	0.903	0.976	0.903	1.000	0.999	0.976
J	1.5%	0.979	0.995	0.979	1.000	1.000	0.995
K	6.5%	0.956	0.989	0.956	1.000	1.000	0.989
L	1.3%	0.990	0.998	0.990	1.000	1.000	0.997
M	0.5%	0.908	0.978	0.908	0.999	0.997	0.977
N	2.0%	0.986	0.996	0.986	1.000	1.000	0.996
O	4.6%	0.960	0.990	0.960	1.000	1.000	0.990
P	5.6%	0.937	0.984	0.937	1.000	1.000	0.984
Q	2.4%	0.971	0.993	0.971	1.000	1.000	0.993
R	4.1%	0.966	0.991	0.966	1.000	1.000	0.991
S	2.3%	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
T	3.3%	0.981	0.995	0.981	1.000	1.000	0.995
U	2.3%	0.982	0.996	0.982	1.000	1.000	0.995
V	0.0%	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
W	1.4%	0.997	0.999	0.997	1.000	1.000	0.999
X	2.4%	0.941	0.985	0.941	1.000	1.000	0.985
Y	0.0%	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Z	1.1%	0.992	0.992	0.992	1.000	1.000	0.992
	<b>10%</b>	<b>0.903</b>	<b>0.954</b>	<b>0.903</b>	<b>0.982</b>	<b>0.964</b>	<b>0.937</b>
	<b>Valor máximo</b>	<b>Valores mínimos</b>					

Analizando los datos de la Tabla 26, se pueda apreciar que la tubería de control “E” es la que limita el avance de la simplificación al alcanzar, los caudales que circulan por ella, una diferencia máxima del 10% con relación a la red original. Es importante resaltar el valor del índice de Nash-Suttcliffe (NS) de la mencionada tubería “E” (NS = 0.932), puesto que evidencia lo que se mencionó en el apartado 3.2.3

respecto a que no es recomendable utilizar este índice por sí solo, sino que debe acompañarse de otro indicador cuantitativo de la eficiencia de la simplificación. En este caso el indicador complementario es el  $\Delta Q_{\max}$ . Si solo se utilizara como validación el NS, se concluiría que la tubería "I" con NS = 0.903 es la crítica, cuando en realidad sus caudales solo difieren  $\Delta Q_{\max} = 4.20\%$ .

Evaluado el comportamiento en los elementos de control, lo siguiente es analizar lo ocurrido en el resto de la red. Para ello, se comparan los caudales horarios de todas las líneas de la red simplificada con las mismas líneas de la red original. La comparación se realiza para cada intervalo horario, y luego dichos valores son promediadas para obtener la diferencia media caudales de cada línea presente en ambas redes (83). Cabe aclarar que el término "líneas" se refiere a todos aquellos elementos a través de los cuales fluye caudal (p. ej. bombas, válvulas, etc.) y no solo a las tuberías.

$$\Delta Q_i = \frac{\sum_{j=1}^{24} |q_j^O - q_j^S|}{24} \quad (83)$$

Donde:

i = líneas de las redes, cuyo valor varía de 1 a 3228 unidades.

$\Delta Q_i$  = diferencia absoluta de caudal medio de la línea i presente en ambas redes, en litros por segundo (lps).

j = intervalo horario.

$q_j^O$  = caudal de la línea i de la red original a la hora j.

$q_j^S$  = caudal de la línea i de la red simplificada a la hora j.

Los resultados se agrupan por intervalos en la Tabla 27 y se grafican en la Figura 77. Se puede observar que el 88.7% de las líneas de la red simplificada poseen una diferencia menor a 0.6 lps con respecto a la red original. Como referencia de comparación, un grifo de lavabo abierto equivale a 0.1 lps, el consumo promedio de una vivienda con dos aseos es de 0.6 lps y el caudal de consumo medio de la red es 1090 lps. Estos valores dan cuenta de que la precisión de la metodología en este aspecto es elevada.

Tabla 27 - Diferencias absolutas de caudal de todas las líneas de la red simplificada.

$\Delta Q_i$ (lps)	Cantidad de líneas	% del total de líneas	% acumulado
< 0.01	325	10%	12.4%
0.01 - 0.1	1368	42%	54.8%
0.1 - 0.6	1096	34%	88.7%
> 0.6	363	11%	100.0%

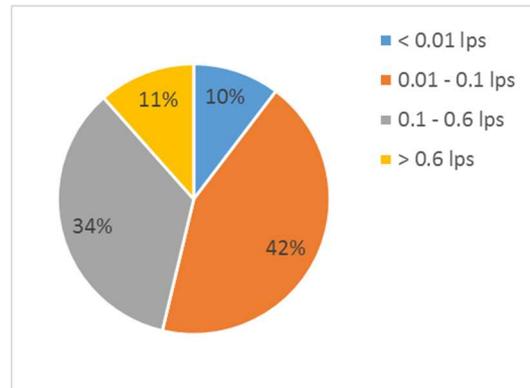


Figura 77 - Distribución de líneas según  $\Delta Q_i$  (lps).

Para concluir con el estudio de eficiencia de caudales, se calcula que porcentaje del total de tuberías tiene una diferencia menor a la de consigna ( $\Delta Q_{adm} = 10\%$ ) preestablecida. De esta forma, se cuantifica la representatividad que tienen las tuberías de control en relación a la red en conjunto o, en otras palabras, la capacidad que poseen estos elementos para influir en sus zonas aledañas logrando que se cumplan en ellas los requisitos de precisión impuestos. Las diferencias relativas medias de cada línea se obtienen según la ecuación (84).

$$\Delta Q_{i-rel} = \frac{\sum_{j=1}^{24} \left| \frac{q_j^o - q_j^s}{q_j^o} \cdot 100 \right|}{24} \quad (84)$$

Donde:

$\Delta Q_{i-rel}$  = diferencia relativa de caudal media de la línea i presente en ambas redes, en lps.

Como se puede ver en la Tabla 28, el 64.6% de las líneas cumple con la consigna predefinida para los elementos de control, por lo que se considera que los resultados obtenidos son aceptables. Con el objetivo de comprender la razón por la cual el 35.4% restante no cumple con la consigna, se analiza la ubicación y características de las tuberías con mayores diferencias relativas  $\Delta Q_{i-rel}$ . De esta observación se concluye que en general estos conductos:

- Forman parte de mallas de tuberías de pequeño diámetro que no afectan a la hidráulica general de la red.
- Trasiegan bajos valores de caudales, por lo que pequeñas variaciones de flujo provocan elevadas diferencias porcentuales  $\Delta Q_{i-rel}$ .

Adicionalmente a las observaciones particulares mencionadas, existen dos razones por las cuales es correcto afirmar que el 35.4% de las líneas que no cumple con la consigna no es influyente en el resto de la red:

- Debido a la ubicación estratégica de los elementos de control, el cumplimiento de la consigna en los mismos garantiza que el funcionamiento global de la red simplificada sea semejante a la red original.
- El valor de las alturas piezométricas en la red simplificada posee una variación menor al 10 % en el 100% de los nudos, tal como fue presentado en el apartado 6.2.2.

Tabla 28 - Diferencias relativas de caudales de todas las líneas de la red simplificada.

$\Delta q_i$ -rel (lps)	Cantidad de líneas	% del total de líneas	% acumulado
< 5%	1566	48.5%	48.5%
5 - 10 %	520	16.1%	64.6%
10 - 25 %	584	18.1%	82.7%
> 30 %	560	17.3%	100.0%

### 6.3 Curva de consigna

Tal como se explicó en apartados anteriores, cada simplificación de nudos viene acompañada de un cálculo de la curva de altura de consigna. Esta curva establece la altura piezométrica que debe poseer el nudo eliminado para garantizar que tanto en él mismo como en los nudos ubicados aguas abajo (para nudos y bloques terminales) o contiguos (para nudos intermedios y cercanos) se cumpla la altura mínima predefinida por el usuario de la metodología.

Para utilizar de forma práctica esta valiosa información, una alternativa interesante es la que ofrece el mismo EPANET. El software permite cargar curvas de calibración en el archivo de la red simplificada y luego visualizarlos a través de gráficos de evolución temporal. A modo de ejemplo se presentan las curvas del nudo 3164 perteneciente al caso de estudio simplificado en la Figura 78.

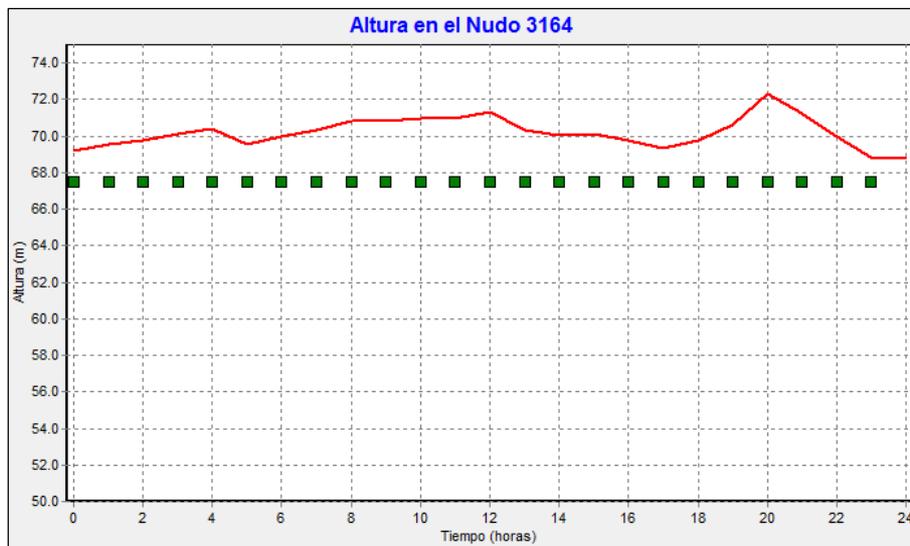


Figura 78 - Ejemplo de curva de altura de consigna en software EPANET

Cabe destacar que, puesto a que el método brinda la información necesaria, el gráfico de la Figura 78 puede elaborarse para cada nudo de la red simplificada. De esta manera, el operador puede visualizar de forma sencilla la altura piezométrica requerida mientras opera con el modelo reducido.

A modo de conclusión, se puede afirmar que el caso de estudio presentado cumple con el objetivo de demostrar la utilidad y aplicabilidad de la metodología propuesta. A su vez, sirve como base de ejemplo para abordar otras redes y poder realizar comparaciones de comportamiento del método.

## 7. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

### 7.1 Conclusiones

A partir del trabajo de investigación presentado, en el cual se ha desarrollado una metodología de simplificación de modelos matemáticos de redes de distribución de agua potable realizados con el software EPANET, surgen interesantes planteos y conclusiones. A continuación se presentan aquellos de mayor relevancia clasificados según la sección del estudio a la cual hacen referencia.

De los modelos matemáticos y el estado del arte de la simplificación:

- Los modelos matemáticos digitales constituyen una gran alternativa actual para representar redes de distribución de agua potable de gran complejidad. Existen numerosos softwares de modelación, de los cuales se destaca EPANET por su eficiencia de cálculo y su gratuidad de licencia.
- La necesidad de simplificación de redes ha estado presente desde el desarrollo de los primeros modelos matemáticos. Métodos manuales como el de Hardy Cross (1936) precisaban de RDA reducidas para ser prácticos y eficientes. El desarrollo de nuevos algoritmos de cálculo y el avance tecnológico lograron en cierta manera disminuir esta necesidad de reducción. Sin embargo, para aplicación de algoritmos de optimización, para planes de inversión estratégicos, para entendimiento global del funcionamiento de la red, entre otras tantos trabajos, es preciso contar un modelo esquelizado que minore los costes computacionales y de recursos humanos.
- Diversas metodologías de simplificación se han desarrollado hasta la actualidad, las cuales pueden clasificarse en métodos basados en técnicas convencionales y métodos alternativos. Del primer grupo se destacan aquellas que, fundadas en operaciones topológicas, realizan diferentes ajustes en las características físicas de los componentes de la red para garantizar fiabilidad en los resultados. Del segundo grupo sobresalen aquellos que mediante complejos algoritmos logran generar redes hidráulicamente equivalentes con considerable menor cantidad de elementos, tales como los métodos de agrupación por clústeres.
- A nivel general, todos los especialistas coinciden en que la mejor técnica de reducción es aquella que se adapta al objetivo que se persigue con la elaboración del modelo. Habrá una técnica de reducción ideal para cada tipo de análisis de red que se quiera ejecutar.

De la metodología de simplificación propuesta:

- La metodología presentada está fundada sobre algunos de los aciertos logrados por métodos anteriores y busca a la vez resolver ciertas falencias de los mismos. El objetivo que persigue es convertirse en una técnica de simplificación alternativa práctica, versátil y fiable.

- La practicidad se logra al estar basada en técnicas de reducción topológicas de sencilla interpretación. El usuario puede en todo momento del proceso conocer la operación de simplificación que se está ejecutando y el efecto que produce la misma en el resto de la red.
- Adicionalmente, la posibilidad de ubicar elementos de control en las zonas críticas que el usuario considere aumenta aún más la practicidad del método. Este nivel de control sobre lo que se simplifica es algo que no suele ser sencillo de conseguir con otros algoritmos alternativos.
- La versatilidad la brinda la posibilidad de definir los parámetros de simplificación. El error admisible de caudal y presión, la localización y número de elementos de control, la demanda base máxima, entre otros, otorgan al usuario el control completo del tipo de esqueletización a ejecutar.
- Otro aspecto importante a destacar del método propuesto es que, si bien es un procedimiento global, está compuesto por sub procesos (nodos terminales, nodos intermedios, etc.) que pueden aplicarse de manera independiente, en el orden y cantidad que la persona usuaria lo desee. Esto aumenta considerablemente la versatilidad de la metodología.
- La fiabilidad es obtenida a través de la validación continua de cada operación de reducción. Este control es realizado en base a los parámetros de calidad definidos por el usuario, por lo tanto, el resultado que se consiga será completamente acorde a sus preferencias.
- La metodología intenta resolver el problema que presentan otros métodos que exigen al usuario elegir uno a uno que elementos simplificar, algo que es muy complicado de hacer si no se conoce el efecto que tiene cada eliminación en el resto de la red. Al fijar parámetros iniciales de simplificación y validación, el algoritmo se encarga por sí mismo de identificar qué elementos de la RDA son prescindibles y cuales deben conservarse para mantener la representatividad buscada.
- En línea con el punto anterior, el método resuelve también la incertidumbre existente alrededor de la decisión de cuando detener la simplificación. Por cómo está formulado, el algoritmo dejará de eliminar componentes cuando la red reducida no cumpla con los parámetros de representatividad de la red original definidos por el usuario.
- Por último, la propuesta aporta además de lo anterior, una solución al problema de la información que se pierde al simplificar una red. La relocalización de demandas base y el cálculo de altura de consigna para cada nudo eliminado brindan al usuario los datos necesarios para operar con la RDA esqueletizada sin perder de vista las necesidades hidráulicas de la red original.

De la herramienta informática desarrollada:

- Esta versión inicial, mejorable e incluso ampliable, constituye un instrumento de gran utilidad para aplicar la metodología de forma rápida y eficiente.
- Al estar basada en el software EPANET que es de libre distribución, brinda la posibilidad al usuario de realizar cambios en el código para adaptarlo acorde a sus necesidades de estudio particulares.
- Constituye la base a partir de la cual elaborar nuevas herramientas de análisis de simplificación de redes en estudios futuros.

De los resultados obtenidos en el caso de estudio:

- Con un sencillo análisis de sensibilidad se ha podido identificar la influencia que tiene cada parámetro en la simplificación. La conclusión principal es que el efecto que produce el valor de un parámetro está siempre vinculado al valor de los demás y a la RDA que se esté analizando. En el caso de estudio de este trabajo, se concluye que los parámetros topológicos de demanda base, diferencia admisible de diámetros y rugosidad de tuberías son los principales influyentes en el tamaño que tendrá la red simplificada puesto que limitan de forma directa el conjunto de elementos que pueden ser alcanzados por el algoritmo.
- En cuanto a las alturas piezométricas en los nudos de la RDA simplificada, los resultados son óptimos. El 100% de ellos cumple con una diferencia menor al 1mca con lo cual, se concluye que la metodología es exitosa en este aspecto.
- En relación a los caudales, los valores resultantes en la red reducida también se asemejan con gran precisión a los de la red original. El 88 % de las tuberías presenta diferencias menores a 0.6 lps, cuando el caudal de consumo medio de la red es 1090 lps.

## 7.2 Desarrollos futuros

Si bien el presente trabajo cumple con los objetivos iniciales planteados, a partir del desarrollo del mismo surgen nuevos desafíos de investigación de gran interés que debieran ser abordados en estudios futuros. Ellos son:

- Hacer extensiva la metodología para análisis de calidad de agua. Para ello, las operaciones de simplificación deberían incluir nuevos ajustes topológicos e hidráulicos. Esto permitiría conservar las características de la red que influyen en el transporte y conservación de sustancias. Un concepto fundamental a resolver es el tiempo de viaje del agua, ya que tiene directa relación con la calidad de la misma. Longitudes, diámetros y rugosidades equivalentes deberían recalcularse para cumplir con esta premisa.  
Por otra parte, resultaría interesante aplicar el concepto de curva de consigna también a la calidad del agua. De este modo, al igual que con las alturas piezométricas, el operador de la red simplificada contaría con la información de concentración mínima de sustancia que debe tener en cada nudo de la red para garantizar la calidad del servicio. Esto sería muy útil para aplicar

luego algoritmos de optimización con los cuales definir la ubicación de estaciones de desinfección, entre otras cosas.

- Incluir en el análisis hidráulico los consumos dependientes de la presión, representados en los modelos a través de emisores. Esto ampliaría la aplicabilidad de la metodología, permitiendo que fuera utilizada en el campo de la eficiencia hidráulica y energética. La complejidad del caso radica en que, a la hora de simplificar un nudo, no solo se debería relocalizar la demanda base del mismo sino que también sería necesario trasladar el respectivo emisor al nudo base. Puesto que dicho nudo tendría presiones diferentes al eliminado, cálculos iterativos deberían ser realizados hasta obtener el sistema simplificado equivalente, en el cual se respetara con la mayor precisión posible la cantidad de agua que egresa de la red.
- Desarrollar la herramienta informática para poder ser difundida y utilizada a nivel académico por otros investigadores. Una posible mejora sería incluir gráficos y tablas como nuevos formatos de los datos de salida, lo cual ayudaría al usuario a interpretar los resultados de forma más simple y directa.

### 7.3 Indicios de calidad

El presente trabajo ha sido enviado para aprobación al 2020 World Environmental & Water Resources Congress a desarrollarse en Milwaukee, Wisconsin del 23 al 26 de mayo del año 2021.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abokifa, A. A., Biswas, P., Hodges, B. R., & Sela, L. (2020). WUDESIM: a toolkit for simulating water quality in the dead-end branches of drinking water distribution networks. *Urban Water Journal*, 17(1), 54–64. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1734949>
- Anderson, E. J., & Al-Jamal, K. (1995). Hydraulic-network simplification. In *Journal of water resources planning and management*, June, 235–240.
- Bahadur, R., Johnson, J., Janke, R., & Samuels, W. B. (2006). Impact of model skeletonization on water distribution model parameters as related to water quality and contaminant consequence assessment. *8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*, 64. [https://doi.org/10.1061/40941\(247\)64](https://doi.org/10.1061/40941(247)64)
- Brkić, D., & Praks, P. (2019). Short overview of early developments of the Hardy Cross type methods for computation of flow distribution in pipe networks. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/app9102019>
- Bucaramanga. (2014). *Visual Basic . Net y ASP . NET Manual Lenguaje de programacion avanzado I y II*.
- Camargo, A. P., & Sentelhas, P. (1997). Evaluación del desempeño de diferentes métodos de estimación de la evapotranspiración potencial en el estado de São Paulo. *Revista Brasil Meteorologia*, 5, 89–97.
- Cesario, L. (1995). *Modeling, Analysis, and Design of Water Distribution Systems*. Ed. AWWA.
- Deuerlein, J. W. (2008). Decomposition Model of a General Water Supply Network Graph. *Journal Of Hydraulic Engineering @ ASCE*. <http://www.openprocessing.org/visuals/?visualID=1260>
- Ramalingam, D., Lingireddy, S., & Ormsbee, L. E. (2002). History of Water Distribution Network Analysis: Over 100 Years of Progress. In *Environmental and Water Resources History* (pp. 55-67).
- Díaz Allué, M. (1991). La Orientación en el contexto de las Ciencias de la Educación. *Revista Complutense de Educación*, 2(3), 431–454. <https://doi.org/10.5209/RCED.18967>
- Duzinkiewicz, K., & Ciminski, A. (2006). Drinking water distribution system modelling - An approach to skeletonization. In *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* (Vol. 1, Issue PART 1). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20060830-2-SF-4903.00043>
- 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>
- Elsheikh, M. A., Saleh, H. I., Rashwan, I. M., & El-Samadoni, M. M. (2013). Hydraulic modelling of water supply distribution for improving its quantity and quality. *Sustainable Environment Research*, 23(6), 403–411.
- Engineering News-Record. (1957). Computer firm sells pipeline net analysis. *Field and Office*.
- Fox, D. G. (1981). Judging Air Quality Model Performance: a summary of the AMS workshop on dispersion model performance, woods hole. In *Bulletin of the American Meteorological Society* (Vol 62, 5, pp. 599–609). [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1981\)062<0599:jaqmp>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1981)062<0599:jaqmp>2.0.co;2)
- Giustolisi, O., & Todini, E. (2009). Pipe hydraulic resistance correction in WDN analysis. *Urban Water Journal*, 6(1), 39–52. <https://doi.org/10.1080/15730620802541623>

- Giustolisi, Orazio, Savic, D. A., & Kapelan, Z. (2010). Analysis of simplification errors for water distribution models. *Water Distribution Systems Analysis 2010 - Proceedings of the 12th International Conference, WDSA 2010*, 1400–1412. [https://doi.org/10.1061/41203\(425\)125](https://doi.org/10.1061/41203(425)125)
- Grayman, W. M., & Rhee, H. (2000). Assessment of skeletonization in network models. *Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management 2000: Building Partnerships*, 104(1), 1–10. [https://doi.org/10.1061/40517\(2000\)196](https://doi.org/10.1061/40517(2000)196)
- Hamberg, D., & Shamir, U. A. (1988). Schematic models for distribution systems design. I: Combination concept. In *Journal of Water Resources Planning and Management*, 114(2), 129–140.
- Hellbach, C., Moderl, M., Sitzenfrei, R., & Rauch, W. (2011). Influence of Network Properties and Model Purpose on the Level of Skeletonization. *World Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing Knowledge for Sustainability*, 137–145.
- Huang, Y., Zheng, F., Duan, H. F., Zhang, T., Guo, X., & Zhang, Q. (2019). Skeletonizing pipes in series within urban water distribution systems using a transient-based method. *Journal of Hydraulic Engineering*, 145(2), 1–10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001560](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001560)
- Iglesias, P. L., López, P. A., & Martínez, F. J. (2004). Epanet 2.0 vE. Manual de usuario. Ed. Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos, Valencia. (Traducción comentada del texto original de Rossmann, L. *Epanet 2.0 Users Manual*).
- Ilaya-Ayza, A. E., Izquierdo, J., Pérez-García, R., Martins, C., & Ayala-Cabrera, D. (2017). La curva de consigna, una herramienta útil para la esqueletización, sectorización y determinación de la capacidad de una red de suministro de agua. *Acta Universitaria*, 26, 54–63. <https://doi.org/10.15174/au.2016.1026>
- Izquierdo, J., Campbell, E., Montalvo, I., Pérez-García, R., & Ayala-Cabrera, D. (2013). Error analysis of some demand simplifications in hydraulic models of water supply networks. *Abstract and Applied Analysis*. <https://doi.org/10.1155/2013/169670>
- Jain, S. K., & Sudheer, K. P. (2008). Fitting of hydrologic models: A close look at the nash-sutcliffe index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(10), 981–986. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2008\)13:10\(981\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:10(981))
- Jiang, B., Shi, Y., Gao, J., & Zhao, H. (2013). Study on the simplification of the large water distribution network model. In *ASCE 2013* (Vol. 136, Issue 5, pp. 1–10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2006\)132:4\(209\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2006)132:4(209))
- Jung, B. S., Boulos, P. F., & Wood, D. J. (2007). Impacts of skeletonization on distribution system hydraulic transient models. In *World Environmental and Water Resources Congress 2007: Restoring Our Natural Habitat*. [https://doi.org/10.1061/40927\(243\)456](https://doi.org/10.1061/40927(243)456)
- M Gad, A. A., & Mohammed, H. I. (2012). Impact of pipes networks simplification on water hammer phenomenon. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 39(5), 1227–1244. <https://doi.org/10.1007/s12046-014-0260-7>
- 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>
- Martínez-Solano, F. J., Iglesias-Rey, P. L., Mora-Meliá, D., & Fuertes-Miquel, V. S. (2017). Exact Skeletonization Method in Water Distribution Systems for Hydraulic and Quality Models. *Procedia Engineering*, 186, 286–293. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.246>

- 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)
- Martinez Alzamora, F., & Vidal, R. (1996). La Regulación de los Sistemas Hidráulicos.
- McCuen, R. H., Knight, Z., & Cutter, A. G. (2006). Evaluation of the Nash-Sutcliffe efficiency index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 11(6), 597–602. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2006\)11:6\(597\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:6(597))
- Molnar, P. (2011). “Calibration”. Watershed Modelling. *Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.*
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Ostfeld, A., Über, J. G., Salomons, E., Berry, J. W., Hart, W. E., Phillips, C. A., Watson, J. P., Dorini, G., Jonkergouw, P., Kapelan, Z., di Pierro, F., Khu, S. T., Savic, D., Eliades, D., Polycarpou, M., Ghimire, S. R., Barkdoll, B. D., Gueli, R., Huang, J. J., ... Walski, T. (2008). The battle of the water sensor networks (BWSN): A design challenge for engineers and algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(6), 556–568. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2008\)134:6\(556\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2008)134:6(556))
- Paluszczyszyn, D. (2015). Advanced modelling and simulation of water distribution systems with discontinuous control elements.
- Paluszczyszyn, D., Skworcow, P., & Ulanicki, B. (2011). Online simplification of water distribution network models. *Urban Water Management: Challenges and Opportunities - 11th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI 2011*, 3.
- Paluszczyszyn, D., Skworcow, P., & Ulanicki, B. (2015). A tool for practical simplification of water networks models. *Procedia Engineering*, 119(1), 486–495. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.871>
- Perelman, L., Maslia, M., Ostfeld, A., & Sautner, J. (2008). Using aggregation/skeletonization network models for water quality simulations in epidemiologic studies. *AWWA, June*, 122–133.
- Perelman, L., & Ostfeld, A. (2011). Topological clustering for water distribution systems analysis. *Environmental Modelling and Software*, 26(7), 969–972. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.01.006>
- Qin, T., & Boccelli, D. L. (2017). Grouping Water-Demand Nodes by Similarity among Flow Paths in Water-Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(8), 04017033. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000788](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000788)
- Raczynski, A., Kirkpatrick, W., Rehnstrom, D., Boulos, P., & Lansey, K. (2008). Developing hydraulic and water quality equivalent systems. In *Water Distribution Systems Analysis 2008 (pp. 1-8)*.
- Rivas, C. A. L. (2017). *Visual Basic .Net*. <https://www.mindmeister.com/es/805346650/visual-basic-net?fullscreen=1#>
- Rossman, L. A. (2000). EPANET 2 Users Manual EPA/600/R-00/57. *Water Supply and Water Resources Division, U.S. Agency, Environmental Protection, September.*
- Saldarriaga, J. G., García, S., & León, N. (2012). A methodology to preserve water quality modeling in

- Skeletonized Networks Models. *World Environmental and Water Resources Congress 2012: Crossing Boundaries* © ASCE 2012 2247, 2247–2252.
- Saldarriaga, J. G., Ochoa, S., Nieto, L., & Rodríguez, D. (2009). Methodology for the skeletonization of water distribution network models with demand aggregation. *Integrating Water Systems - Proceedings of the 10th International on Computing and Control for the Water Industry, CCWI 2009*, 423–429.
- Saldarriaga, J. G., Ochoa, S., Rodríguez, D., & Arbeláez, J. (2008). Water Distribution Network Skeletonization Using the Resilience Concept. In *Water Distribution Systems Analysis 2008*, 1-13.
- Shamir, U., & Salomons, E. (2008). Optimal real-time operation of urban water distribution systems using reduced models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(2), 181–185. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2008\)134:2\(181\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2008)134:2(181))
- Shamsi, U. M. (2004). GIS Applications for Water Distribution Systems. *Journal of Water Management Modeling*, 6062, 459–473. <https://doi.org/10.14796/jwmm.r220-21>
- Suárez Ibujes, M. O. (2011). *Coeficiente de correlación de Karl Pearson*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Todini, E., & Pilati, S. (1988). A Gradient Method for the Analysis of Pipe Networks. In *International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution, Leicester Polytechnic, UK*. [http://theodores-pro.ttu.edu/ncimm/research-documents/Todini and Pilati 1988.pdf](http://theodores-pro.ttu.edu/ncimm/research-documents/Todini%20and%20Pilati%201988.pdf)
- Todini, Ezio. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, 2(2), 115–122. [https://doi.org/10.1016/s1462-0758\(00\)00049-2](https://doi.org/10.1016/s1462-0758(00)00049-2)
- Todini, T. (2008). Design, expansion and rehabilitation of water distribution networks aimed at reducing water losses. where are we? *Proceedings of the 10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference, WDSA 2008*. [https://doi.org/10.1061/41024\(340\)33](https://doi.org/10.1061/41024(340)33)
- U. S. Environmental Protection Agency. (2005). *Water Distribution System Analysis: Field Studies, Modeling and Management. A reference guide for utilities. USEPA (ed)*, Cincinnati, Ohio..
- Ulanicki, B., Ulanicka, K., Rance, J. P., Coulbeck, B., Powell, R., & Wang, C. (1998). Benchmarks for water network modelling. In *Proc., Hydroinformatics' 98 (pp. 1469-1476)*. Rotterdam, The Netherlands: Int. Association for Hydraulic Research.
- Ulanicki, B., Zehnpfund, A., & Martinez, F. (1996). Simplification of Water Distribution Network Models. In *In Proc., 2nd Int. Conf. on Hydroinformatics (pp. 493-500)*. Rotterdam, Netherlands: Balkema. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4340.8404>
- Vegas Niño, O. T., Martínez Alzamora, F., Alonso Campos, J. C., & Tzatchkov, V. G. (2017). Iniciación a la programación con la Toolkit de Epanet v2.00.12 en un entorno Windows ®. In *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Walski, T. M., Chase, D. V., Savic, D. A., Grayman, W., Beckwith, S., & Koelle, E. (2003). *Advanced Water Distribution Modeling And Management*. In *Haestad Methods*.
- Willmott, C. J. (1984). On the Evaluation of Model Performance in Physical Geography. *Spatial Statistics and Models*, 1967, 443–460. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-3048-8\\_23](https://doi.org/10.1007/978-94-017-3048-8_23)
- Wtr. Wks. Engineering. (1958). *Digital Computers Take Witchcraft Out of Pipeline Network Analysis*.