



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL SANTA FE

Doctorado en Ingeniería Mención Industrial

TESIS DOCTORAL

“SEGMENTACIÓN Y GESTIÓN EFICIENTE DE REDES DE
DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE”

Tesista: Ing. Jezabel Bianchotti

Director: Dr. Gabriel Puccini

Codirector: Dr. Omar Chiotti

Santa Fe, Argentina

2024

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL

FACULTAD REGIONAL SANTA FE

Se presenta esta Tesis en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Tecnológica Nacional para la obtención del grado académico de Doctor en Ingeniería mención Industrial

“SEGMENTACIÓN Y GESTIÓN EFICIENTE DE REDES DE
DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE”

Ing. Jezabel Bianchotti

Director: Dr. Gabriel Puccini

Codirector: Dr. Omar Chiotti

Jurados de Tesis

Dra. Graciela Zucarelli

Dra. Marian Marcovecchio

Dra. Rosana Hämmerly

Santa Fe, Argentina

2024

Agradecimientos

Una tesis doctoral es un desafío que no se puede afrontar en solitario, tanto en el ámbito de la investigación como en lo personal. Por ello, deseo expresar mi profundo agradecimiento por el invaluable apoyo que he recibido durante este trayecto.

En primer lugar, quiero reconocer a mi director, el Dr. Gabriel Puccini, cuya dedicación y entusiasmo me introdujeron en el fascinante mundo de la investigación y me han acompañado pacientemente en cada etapa, tanto profesional como personalmente. Asimismo, agradezco a mi co-director, el Dr. Omar Chiotti, por su disposición constante para colaborar y por guiarme a lo largo de estos años.

Agradezco también a mis compañeros doctorandos, quienes han compartido este viaje conmigo. A Carlos, quien allanó el camino para aquellos que seguimos sus pasos, y a Melina, quien se unió al equipo de investigación en la línea de redes de agua y con quien he compartido experiencias y crecimiento profesional y personal durante este tiempo. Además, mi reconocimiento se extiende a tantos otros compañeros que, de diversas maneras, han contribuido a mi formación. Su presencia ha sido fundamental en este camino.

Un agradecimiento especial al Ing. Mario Castro-Gama, actualmente Especialista en Infraestructura de Redes de Agua en la empresa Vitens N.V. (Holanda), por la fructífera colaboración en la investigación de sectorización de redes. También quisiera agradecer a todo el personal de AySA, y en particular a la Ing. Alejandra Bettig y al Ing. Pablo Oneto por su apertura y por permitirnos conocer su trabajo y participar en sus proyectos de sectorización.

No puedo dejar de mencionar la labor de los docentes que, con su pasión, han dejado una huella imborrable en los cursos que impartieron. Los contenidos pueden olvidarse, pero la pasión transmitida siempre perdura y contagia.

Expreso mi profunda gratitud hacia la Universidad Tecnológica Nacional, que me brindó la oportunidad de realizar mi doctorado, así como a la Facultad Regional Rafaela y sus autoridades, quienes me han acompañado y apoyado en cada paso de este proceso.

Quiero dedicar un especial agradecimiento a mi esposo, cuyo apoyo incondicional ha sido fundamental en cada etapa de este camino. A mis padres, por su sacrificio permanente, a ellos les debo mi formación. A mis hermanos, sobrino y el resto de mi familia les agradezco todo su apoyo y confianza en cada una de mis elecciones.

Por último, doy gracias a Dios y a mis familiares que ya no están entre nosotros. Su recuerdo y su ejemplo han sido una fuente constante de inspiración, motivándome a superarme cada día y a afrontar los momentos más difíciles de este recorrido.

Resumen

Segmentación y Gestión Eficiente de Redes de Distribución de Agua Potable.

La creciente escasez de agua potable ha llevado a los gobiernos a implementar políticas públicas que promuevan el uso racional del recurso hídrico y adopten tecnologías digitales para optimizar la gestión de las redes de distribución de agua (WDNs, por sus siglas en inglés). Sin embargo, el tamaño de las redes de agua y la naturaleza no lineal de los sistemas hidráulicos hacen que tareas como el control de la calidad del agua, la reducción de fugas y la gestión de la presión sean extremadamente difíciles de llevar a cabo. Para abordar este problema, una solución ampliamente utilizada en todo el mundo consiste en dividir la red en áreas más pequeñas, conocidas como Zonas o Áreas de Medición de Distrito (DMAs, por sus siglas en inglés). Esta división se logra mediante la instalación de elementos de aislamiento y/o la definición de puntos de observación en las conexiones entre distritos. Es importante aclarar que el concepto de DMA se puede aplicar tanto al diseño de una nueva red de distribución de agua potable para una localidad sin servicio como a una red existente que no haya sido originalmente diseñada bajo este concepto. Esta tesis se enfoca en el segundo caso. Por lo tanto, se basa en el estudio empírico de casos de redes de distribución de agua en funcionamiento en diferentes localidades. Para simplificar, estas redes se referirán en esta Tesis como redes reales.

La implementación de DMAs proporciona notables ventajas, como la reducción de pérdidas, una gestión más efectiva de la presión en zonas específicas, la detección más eficiente de roturas de tuberías y la capacidad de aislar sectores para proteger el resto de la red en caso de contaminación. Asimismo, en ciertos casos, permite lograr la independencia de distritos abastecidos por diferentes fuentes de agua y evita la mezcla de suministros provenientes de diversas fuentes. No obstante, es necesario tener en cuenta que también presentan desventajas, como la reducción de redundancia en la conectividad de la red,

la degradación de las presiones y la suspensión del servicio durante las obras de implementación. Además, la reducción de caminos alternativos podría afectar la calidad del agua debido al estancamiento del suministro, aunque este punto no está claro.

Para una misma red de agua potable, es posible identificar múltiples diseños factibles de DMAs cada uno de los cuales estará determinado por los objetivos de gestión y condicionado por las características hidráulicas específicas de la red. Estas características incluyen factores como la cantidad de fuentes de agua disponibles y las presiones de servicio que se pueden alcanzar en diferentes puntos de la red. Por ejemplo, en redes con presiones superiores a las requeridas y con múltiples fuentes de alimentación, se pueden establecer DMAs autónomas capaces de funcionar de manera aislada. En contraste, en redes con presiones insuficientes o con una única fuente de abastecimiento, las DMAs no podrán funcionar de forma aislada, y se buscará detectar las mejores estructuras de comunidades que permitan analizar el funcionamiento interconectado de cada una de ellas.

El diseño óptimo de las DMAs es una tarea compleja debido a las restricciones operativas y los objetivos específicos que se deben cumplir. Inicialmente, se estudió el diseño de las DMAs en una única etapa, utilizando diferentes índices como función objetivo, con incorporación de restricciones o penalidades para considerar presiones mínimas y asignación de fuentes por DMAs. Sin embargo, esta aproximación demostró ser limitada, ya que cada posible solución requería resolver el sistema hidráulico. Esto no representaba un problema significativo para redes pequeñas, pero se convertía en una carga computacional considerable para redes de mayor tamaño. Además, el proceso implicaba realizar un elevado número de iteraciones para explorar el espacio de soluciones, lo que aumentaba aún más la carga computacional. Como resultado, este enfoque se volvía ineficiente e impracticable para redes más grandes.

Para superar estas limitaciones y optimizar el procedimiento, se propuso una metodología en dos etapas. En la primera etapa, se buscó detectar la estructura de comunidades de la red mediante la maximización del índice de modularidad. Para esto, se evaluaron dos índices de modularidad: uno basado en consideraciones topológicas y otro que incorporaba características específicas de los sistemas hidráulicos, como demandas, presiones

o pérdidas de carga. Una característica importante es que esta etapa se realizó sin resolver el sistema hidráulico para cada iteración, lo que permitió acelerar el proceso y reducir la carga computacional. No obstante, debido a la naturaleza combinatoria del conjunto completo de las variables de decisión, el espacio de soluciones factibles demandó la búsqueda de soluciones mediante el uso de técnicas de optimización heurística y metaheurística, incluso para redes de tamaño reducido. Durante el desarrollo de esta etapa, se evaluaron dos enfoques específicos: el uso de un algoritmo heurístico tipo Louvain y el algoritmo metaheurístico conocido como recocido simulado.

La segunda etapa parte de la estructura de comunidades obtenidas en la primera etapa y tiene como objetivo establecer la ubicación óptima de los elementos de aislación o de control entre los tubos que separan a cada DMA. Esta etapa se planteó como un problema de dos objetivos contrapuestos: el primero de los objetivos busca caracterizar el sistema hidráulico y el segundo busca minimizar las conexiones abiertas entre DMAs. Para evaluar los sistemas hidráulicos se plantearon tres métricas: 1) el *índice de resiliencia*, que evalúa la presión disponible en la red para poder sobrellevar fallas, 2) el *coeficiente de Gini*, adaptado para medir la desigualdad en la distribución de las demandas en lugar de la desigualdad económica, y 3) la *desviación estándar*, también aplicada para buscar la homogeneidad en la distribución de las demandas. La configuración completa de los elementos que delimitan a las DMAs da lugar a un amplio conjunto de soluciones factibles debido a su naturaleza combinatoria. Para abordar este desafío, se utilizó nuevamente el método de optimización estocástico denominado recocido simulado.

Las metodologías desarrolladas en el presente trabajo de tesis se han aplicado a dos redes académicas extraídas de bibliografía, y también se han aplicado a una red real de gran tamaño provista por la empresa Agua y Saneamientos Argentinos S.A. (AySA). La colaboración mantenida con AySA ha permitido una comprensión más profunda de los desafíos y dificultades inherentes al diseño de DMAs y la gestión de redes de distribución reales de gran tamaño. En última instancia, se espera que esta investigación contribuya de manera significativa a la sostenibilidad y la conservación de los recursos hídricos, garantizando un suministro adecuado de agua potable para las generaciones futuras.

Índice general

Agradecimientos	IV
Resumen	VI
Lista de Tablas	XIII
Lista de Figuras	XV
Nomenclatura	XIX
1. Introducción	1
1.1. Agua y Desarrollo Social	2
1.1.1. Los desafíos del agua	4
1.2. Estado del Servicio de Agua Potable en Argentina	5
1.3. Redes de Distribución de Agua Potable	7
1.4. Sectorización de Redes de Distribución de Agua Potable	9
1.4.1. Estado actual del conocimiento	13
1.5. Hipótesis	19
1.6. Estructura de la Tesis	20
2. Marco teórico	21
2.1. Resolución de Sistema Hidráulicos	21
2.1.1. Análisis DDA y PDA	23
2.2. Teoría de Redes y Modelos de Sistemas de Distribución de Agua Potable	25
2.2.1. Representación de redes de agua potable	26
2.2.2. Partición de redes	28
2.3. Métricas	30
2.3.1. Índice de resiliencia	30
2.3.2. Coeficiente de Gini	31
2.3.3. Desviación estándar	32
2.4. Optimización	33
2.4.1. Modelos de optimización	33
2.4.2. Optimización Multiobjetivo	35
2.4.3. Conjunto óptimo de Pareto	36
2.5. Métodos heurísticos y metaheurísticos	38

2.5.1.	Elección del método adecuado	40
2.5.2.	Algoritmo Louvain	40
2.5.3.	Recocido Simulado	43
2.5.3.1.	Procedimiento del algoritmo	44
2.6.	Conclusiones	47
3.	Metodología	49
3.1.	Metodología desarrollada	49
3.1.1.	Primera Etapa: Detección de comunidades	51
3.1.2.	Segunda Etapa: División Física del Sistema	51
4.	Detección de comunidades	55
4.1.	Redes Estudiadas	56
4.1.1.	Red CTOWN	56
4.1.2.	Red TRN	57
4.1.3.	Red MLN	58
4.2.	Formulación de Casos	59
4.2.1.	Caso A: modularidad topológica y recocido simulado	60
4.2.2.	Caso B: modularidad característica y recocido simulado	60
4.2.3.	Caso C: modularidad topológica y algoritmo Louvain	61
4.2.4.	Caso D: modularidad característica y algoritmo Louvain	61
4.3.	Análisis Comparativo	62
4.3.1.	Resultados de los casos A y B	62
4.3.2.	Resultados de los casos C y D	63
4.4.	Aplicación de la Metodología a la red MLN	65
4.5.	Conclusiones	66
5.	Diseño de las DMAs	69
5.1.	Estudio Comparativo de Métricas para el Diseño de DMAs	69
5.1.1.	Formulación multiobjetivo de problemas	70
5.2.	Resultados	72
5.2.1.	Red TRN	72
5.2.2.	Red MLN	75
5.3.	Conclusiones	80
6.	Aplicación a una red de AySA	83
6.1.	Red DLZ	84
6.2.	Sectorización de la Red DLZ	85
6.2.1.	Detección de comunidades	86
6.2.2.	Diseño de macro DMAs	87
6.3.	Análisis de Velocidades	90
6.4.	Conclusiones	94
7.	Estudio de Red Real: NDLZ	97
7.1.	Red NDLZ	97

7.2. Sectorización de la Red NDLZ	98
7.2.1. Detección de comunidades	99
7.2.2. Diseño de DMAs	99
7.3. Balances de masa de las DMAs	105
7.3.1. Balance para la DMA 1	106
7.3.2. Balance para la DMA 10	107
7.4. Conclusiones	108
8. Conclusiones	111
8.1. Conclusiones	111
A. Balances de masa red NDLZ	119
A.0.1. DMA 1	119
A.0.2. DMA 2	120
A.0.3. DMA 3	121
A.0.4. DMA 4	121
A.0.5. DMA 5	123
A.0.6. DMA 6	123
A.0.7. DMA 7	124
A.0.8. DMA 8	125
A.0.9. DMA 9	126
A.0.10. DMA 10	127
A.0.11. DMA 11	127
A.0.12. DMA 12	128
A.0.13. DMA 13	129
Bibliografía	131

Índice de tablas

1.1. Condiciones de déficit de servicio de agua potable	6
5.1. Condiciones de operación para cada solución obtenida para la pérdida de Resiliencia para la red TRN.	73
5.2. Condiciones de operación para cada solución obtenida para el Coeficiente de Gini para la red TRN.	73
5.3. Condiciones de operación para cada solución obtenida para la desviación estándar para la red TRN.	73
5.4. Condiciones de operación de cada solución obtenidas con Pérdida de resiliencia para red MLN. El fondo gris corresponde a la solución A representada en la Figura 5.5.	77
5.5. Condiciones de operación de cada solución obtenidas con coeficiente de Gini para red MLN. El fondo gris corresponde a la solución B representada en la Figura 5.5.	77
5.6. Condiciones de operación de cada solución obtenidas con Desviación estándar para red MLN. El fondo gris corresponde a la solución C representada en la Figura 5.5.	78
6.1. Condiciones de operación para la solución con 60 válvulas obtenida en la segunda etapa	89
6.2. Condiciones de operación para cada escenario de velocidades en m/s. Longitudes y presiones expresadas en m.	92
7.1. Presiones características para la red NDLZ original y sectorizada	104
7.2. Condiciones de operación de la DMA 1	107
7.3. Condiciones de operación de la DMA 10	108
A.1. Condiciones de operación de la DMA 1	120
A.2. Condiciones de operación de la DMA 2	121
A.3. Condiciones de operación de la DMA 3	121
A.4. Condiciones de operación de la DMA 4	122
A.5. Condiciones de operación de la DMA 5	123
A.6. Condiciones de operación de la DMA 6	124
A.7. Condiciones de operación de la DMA 7	125
A.8. Condiciones de operación de la DMA 8	125
A.9. Condiciones de operación de la DMA 9	127

ÍNDICE DE TABLAS

A.10.Condiciones de operación de la DMA 10	127
A.11.Condiciones de operación de la DMA 11	128
A.12.Condiciones de operación de la DMA 12	129
A.13.Condiciones de operación de la DMA 13	129

Índice de figuras

1.1. Representación de los componentes esenciales de una red de distribución de agua potable	8
1.2. Ejemplos de redes	9
1.3. Esquema de sectorización de red de distribución de agua potable en DMAs	10
2.1. Esquema de red pequeña	27
2.2. Dominancia de soluciones y frente Pareto	37
2.3. Procedimiento del algoritmo recocido simulado	45
2.4. Procedimiento de Metrópolis	46
3.1. Proceso esquemático del diseño de áreas de medición de distrito (DMAs) para una red simple siguiendo la metodología propuesta.	52
3.2. Esquema de comunidades obtenidas y matriz de adyacencia reducida obtenida	53
4.1. Red CTOWN	56
4.2. Red TRN	57
4.3. Red MLN	58
4.4. Esquema de casos de estudio	59
4.5. Conjunto Pareto de soluciones para la red CTOWN para los casos A y B	62
4.6. Comunidades detectadas para la red CTOWN	63
4.7. Comunidades detectadas para la red TRN	64
4.8. Comunidades para MLN	66
5.1. Conjuntos de Pareto de soluciones para la red de tres embalses (TRN) obtenidas con las tres métricas (M) estudiados. P_R : pérdida de resiliencia, G : coeficiente de Gini, S : desviación estándar.	72
5.2. DMAs obtenidas después de la segunda etapa para cada M . (A) Pérdida de resiliencia, (B) Coeficiente de Gini y (C) Desviación estándar. Las soluciones corresponden a las indicadas en la Figura 5.1 y a las filas de color gris en las Tablas 5.1, 5.2 y 5.3.	74
5.3. Distribución de demandas por DMA para cada solución A , B y C para la red TRN. Código de colores correspondiente a las DMA de la Figura 5.2	74
5.4. Presiones nodales para las soluciones A , B y C para red TRN. Código de colores correspondiente a las DMA de las Figuras 5.2	75

ÍNDICE DE FIGURAS

5.5. Conjuntos de Pareto de soluciones para red MLN obtenidas con las tres métricas estudiadas. P_R : pérdida de resiliencia, G : coeficiente de Gini, S : desviación estándar.	76
5.6. DMA obtenidos para la red MLN. Las soluciones A, B y C son las indicadas en la Figura 5.5 para (A) Pérdida de resiliencia, (B) Coeficiente de Gini y (C) Desviación estándar.	78
5.7. Distribución de la demanda por DMA para las soluciones A, B y C para la red MLN. Codifique los colores correspondientes a las DMA de la Figura 5.6	79
5.8. Variación temporal de presión para solución A, B y C para red MLN. Cada paso de tiempo representa un diagrama de caja para la presión de todos los nodos de la red.	80
6.1. Red real DLZ.	85
6.2. Comunidades detectadas para la red DLZ en la primera etapa de optimización.	86
6.3. Frente de Pareto de soluciones obtenidas en la segunda etapa.	88
6.4. Variación de presión de todos los nodos para cada solución obtenida luego de la segunda etapa.	88
6.5. Esquema de selección de diámetros.	91
6.6. Histogramas de velocidades de la red (A) Red Original, (B) Red sectorizada y (C) Red sectorizada y modificada para las velocidades mayores que 1,5	93
6.7. Variación de presiones nodales para cada iteración según la velocidad de criterio.	94
7.1. Red NDLZ. Identificado en color rojo el sector este de la red que cuenta con DMAs diseñados con sistema de doble cabecera.	98
7.2. Distritos obtenidos para el sector oeste de la red NDLZ.	100
7.3. Conjunto de Pareto de soluciones de la segunda etapa para la red NDLZ.	101
7.4. Diagrama de cajón y bigote de cada solución obtenida para el conjunto de Pareto de soluciones de la segunda etapa.	102
7.5. Posición final de los caudalímetro y de las válvulas de aislación para la solución seleccionada.	102
7.6. Presiones nodales por distritos para la red NDLZ original y optimizada.	103
7.7. Caracterización del sistema hidráulico sectorizado	106
7.8. Análisis de interacción de la DMA 1	107
7.9. Análisis de interacción de la DMA 10	108
A.1. Análisis de interacción de la DMA 1	120
A.2. Análisis de interacción de la DMA 2	120
A.3. Análisis de interacción de la DMA 3	122
A.4. Análisis de interacción de la DMA 4	122
A.5. Análisis de interacción de la DMA 5	123
A.6. Análisis de interacción de la DMA 6	124
A.7. Análisis de interacción de la DMA 7	124

A.8. Análisis de interacción de la DMA 8	126
A.9. Análisis de interacción de la DMA 9	126
A.10. Análisis de interacción de la DMA 10	127
A.11. Análisis de interacción de la DMA 11	128
A.12. Análisis de interacción de la DMA 12	128
A.13. Análisis de interacción de la DMA 13	129

Nomenclatura

α	Parámetro de enfriamiento
β	Parámetro de control de aumento de iteraciones
ΔE	Variación de Energía
γ	Parámetro de resolución estructural
$\Pi(\Delta E, T)$	Probabilidad de Boltzmann
A_{ij}	Elemento ij de la matriz de adyacencia
$BestCost$	Costo de la mejor solución
$BestS$	Mejor solución
$CurCost$	Costo de la solución actual
$CurS$	Solución actual
d_i	Demanda entregada al nodo i
f_i	Función Objetivo
G	Coefficiente de Gini
h_i	Carga del nodo i
I_R	Índice de resiliencia
k_i	Grados del vértice i
M	Número de iteraciones a temperatura fija

NOMENCLATURA

M_i	Módulo i
MLN	Red de cinco embalses
n_0	Número de fuentes de abastecimiento de una red
n_n	Número de nodos de una red
n_p	Número de tuberías de una red
$NewS$	Nueva solución
P_i	Presión del nodo i
P_i^*	Presión mínima de servicio del nodo i
P_i^{req}	Presión requerida de servicio del nodo i
P_R	Pérdida de resiliencia
Q_C	Modularidad característica
Q_T	Modularidad topológica
S	Desviación estándar
T	Temperatura
T_0	Temperatura inicial
TRN	Red de tres embalses
w_k	Propiedad de seleccionada de las tuberías de la red
\mathbf{A}_0	Matriz de adyacencia reducida
\mathbf{A}_{nn}	Matriz de adyacencia
\mathbf{A}_{pn}	Matriz de incidencia
\mathbf{A}_{pp}	Matriz diagonal de las resistencias de las tuberías
\mathbf{d}	Matriz de demandas nodales

H	Matriz de cargas nodales
Q	Matriz de caudales de cada tubería
K_B	Constante de Boltzmann
x	Vector de variables de decisión
DDA	Resolución hidráulica impulsada por demandas
DMA	Área de medición de distrito
PDA	Resolución hidráulica impulsada por presiones

Capítulo 1

Introducción

A medida que el agua se presenta como la fuente fundamental e insustituible de vida para el ecosistema, se convierte en un bien vital que pertenece en común a todos los habitantes de la Tierra. La salud individual y colectiva depende de ella, y la agricultura, la industria y la vida doméstica están íntimamente relacionadas con ella. Su carácter irremplazable significa que toda la comunidad humana, y cada uno de sus miembros, debe tener el derecho de acceso al agua, en particular al agua potable, en la cantidad y calidad necesarias e indispensables para la vida y la actividad económica. No hay producción de riqueza sin acceso al agua.

Manifiesto del Agua, Comité por el Contrato del Agua, 1998

En este primer capítulo se introduce la temática de trabajo, presentando el panorama mundial actual. Se estudian los objetivos perseguidos en cuanto al desarrollo sustentable, los avances realizados hasta el momento, los desafíos futuros y las dificultades que aún se deben afrontar. También se analiza la situación de las redes de agua potable, con un enfoque particular en Argentina. Se examina su situación actual, su potencial y las tendencias a nivel nacional. Luego, se presentan conceptos importantes para comprender el desarrollo de la tesis, incluyendo las diferentes topologías de redes de agua y una definición de áreas de medición de distrito. Finalmente, se describe la situación problemática que se abordará en el presente trabajo.

1.1. Agua y Desarrollo Social

El agua es un recurso fundamental para el desarrollo sostenible, ya que contribuye al desarrollo socioeconómico, la preservación de los ecosistemas saludables y la supervivencia humana. Además, es esencial para reducir la carga mundial de enfermedades, mejorar la salud, el bienestar y sostener la productividad de las poblaciones, así como para la producción y la preservación de una variedad de beneficios y servicios de los que gozan las personas. El agua también juega un papel clave en la adaptación al cambio climático, sirviendo de eslabón entre el sistema climático, la sociedad y el medio ambiente.

El derecho humano al agua y al saneamiento fue reconocido por la Asamblea General de las Naciones Unidas en julio de 2010, mediante la Resolución A/RES/64/292. Esta Resolución reconoció por primera vez en la historia “el derecho al agua potable y al saneamiento seguro y limpio como un derecho humano esencial para el pleno disfrute de la vida y todos los derechos humanos”. Según la resolución, todos los seres humanos tiene derecho a acceder a una cantidad de agua suficiente para el uso doméstico y personal (entre 50 y 100 litros de agua por persona y día), que sea segura, aceptable y asequible (el costo del agua no debería superar el 3% de los ingresos del hogar), y que esté físicamente accesible. En septiembre de 2015, la Asamblea General de las Naciones Unidas aprobó el documento “*Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*” ([Organización de las Naciones Unidas, 2015](#)), que establece 17 objetivos con 169 metas para el año 2030. Estos objetivos son integrados e indivisibles, y abarcan las esferas económica, social y ambiental. Una de las bases de esta agenda para el desarrollo sostenible es precisamente abordar la situación de la salud mundial y poder contar con previsibilidad para el futuro. En este sentido, el acceso al agua potable segura es un derecho humano fundamental y una condición indispensable para el desarrollo sostenible. El Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (ODS 6) promueve la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos. El incumplimiento del ODS 6 implica un riesgo de no alcanzar muchos de los otros ODS, relacionados con la reducción de la pobreza, la alimentación y la nutrición, la salud humana, la igualdad de género, la energía, el crecimiento económico, las ciudades sostenibles y el medio ambiente.

A pesar de estos múltiples reconocimientos públicos, no se ha logrado evitar que el agua siga siendo un recurso escaso y desigualmente distribuido en el mundo. En las regiones áridas y más pobres, la escasez de agua (acentuada por el cambio climático debido al efecto invernadero) se ve agravada debido a la falta de infraestructura para la captación y el suministro de agua. Por otro lado, en las áreas industrializadas, la creciente demanda de agua debido al crecimiento de la población y al desarrollo de actividades económicas entra en conflicto con un uso no sostenible del recurso natural, lo que resulta en el agotamiento progresivo de los acuíferos y la reducción de la disponibilidad de nuevas fuentes de agua por fenómenos relacionados con la contaminación, además de un desperdicio significativo de agua debido al consumo no racional y a enormes pérdidas de agua en sistemas de suministro y redes de distribución.

Esta situación subraya la urgencia de implementar políticas innovadoras enfocadas en la racionalización y la economía del agua. Dichas políticas deben promover el desarrollo de una auténtica cultura del agua, que se acompañe de una planificación y gestión eficaces de los recursos hídricos y los servicios relacionados. Los sistemas de agua en todo el mundo padecen ineficiencias significativas causadas por estrategias de gestión inadecuadas. Por ejemplo, Italia tiene una red de agua con una longitud total de 210000 km y un nivel general insatisfactorio de conservación. Según el último informe del Instituto Nacional de Estadística italiano (ISTAT), publicado por [Chelli \(2023\)](#), en 2020, el 42,2 % del agua suministrada a las redes de distribución de agua potable no llegó a los usuarios finales. Una cantidad tan considerable sería suficiente para satisfacer las necesidades de agua de más de 44 millones de personas durante un año si estimamos un consumo de 215 litros por habitante por día (equivalente al consumo diario en Italia). Este escenario alarmante tiene varias implicaciones: (a) perjuicio social debido a las dificultades que puede generar la posible escasez de suministro; (b) daños económicos relacionados con la pérdida de grandes volúmenes de agua potable, cuya producción implica altos costos (para la captación, tratamiento, bombeo, etc.), y la inversión necesaria para la investigación y el uso de fuentes complementarias; (c) efectos ambientales causados por la extracción de recursos del ciclo natural y la alteración de los flujos de agua subterránea en el suelo de las redes de distribución.

1.1.1. Los desafíos del agua

El agua es un recurso indispensable para la vida humana y el desarrollo sostenible, pero también es un recurso que enfrenta múltiples desafíos en el mundo. Estos desafíos son el reflejo de las deudas que la humanidad ha contraído con la sociedad y el medio ambiente, al no garantizar el acceso a agua asequible, segura, sostenible y de calidad para todos, como un derecho humano fundamental y como una condición para el bienestar colectivo. Algunos de estos desafíos son los siguientes:

- 2000 millones de personas (el 26 % de la población) no disponen de agua potable y 3600 millones (el 46 %) carecen de acceso a un saneamiento gestionado de forma segura ([Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia y Organización Mundial de la Salud, 2023](#)).
- En el año 2020, en pleno crecimiento del COVID-19, se registró que casi 1800 millones de personas carecían de servicios básicos de agua en sus instalaciones de atención médica, incluidos 100 millones con un servicio limitado y 712 millones sin ningún servicio de agua en absoluto ([Organización Mundial de la Salud, 2020](#)).
- En 2022, el 57 % de la población mundial (4600 millones de personas) utilizaba un servicio de saneamiento gestionado de forma segura ([Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia y Organización Mundial de la Salud, 2023](#)).
- En 2019, 395000 niños menores de cinco años murieron debido a enfermedades diarreicas causadas por las malas condiciones sanitarias o agua no potable ([World Vision International, 2023](#)).
- 2000 millones de personas viven en países que experimentan un alto estrés hídrico, y alrededor de 4000 millones de personas experimentan escasez severa de agua al menos un mes al año ([Organización de las Naciones Unidas, 2019](#)).
- La agricultura cumple un papel esencial en la ecuación del agua, pues le corresponde cerca del 70 % de la extracción de agua dulce ([Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2023](#)).

1.2. Estado del Servicio de Agua Potable en Argentina

Como se ha desarrollado, el acceso al agua potable segura es un derecho humano fundamental y una condición indispensable para el desarrollo sostenible. Sin embargo, en Argentina, este derecho no se garantiza de manera equitativa para toda la población, como lo evidencia el informe del [Ministerio de Obras Públicas, Argentina \(2021\)](#). Este informe analiza la situación del servicio de agua potable en el país, tanto en zonas rurales como urbanas, basándose en datos provenientes de diversas fuentes, como el Censo Nacional de Población y Vivienda de 2010, el Registro Nacional de Barrios Populares (RENABAP) de 2018, el Sistema de Información de Agua Potable y Saneamiento Rural (SIAPySR) de 2020, y el Sistema de Información de Servicios de Agua Potable y Saneamiento Urbano (SISAP) de 2020.

Según dicho informe el 20,1% de la población argentina, es decir, unos 9 millones de personas, carecen de acceso a agua potable segura. Esto significa que no cuentan con un servicio que les provea agua de calidad, en cantidad suficiente, de forma continua, a un precio razonable, desde una fuente cercana a su vivienda y con un aspecto, olor y sabor aceptables. No obstante, esta cifra oculta una gran heterogeneidad territorial, ya que el déficit del servicio varía considerablemente según el tipo y el tamaño de la localidad. El informe clasifica las localidades según cuatro categorías: zonas rurales dispersas, localidades rurales agrupadas de hasta 2000 habitantes, localidades urbanas de entre 2000 y 100000 habitantes, y grandes aglomeraciones urbanas de más de 100000 habitantes. Cada una de estas categorías presenta características y desafíos específicos para la provisión del servicio de agua potable. La [Tabla 1.1](#) resume el déficit de acceso al agua potable segura por categoría de localidad, según el informe:

Como se puede observar en la [Tabla 1.1](#), las zonas rurales dispersas presentan el mayor déficit de acceso al agua potable segura con un 37,6%, lo que afecta unos 450000 habitantes. Estas zonas se caracterizan por tener una baja densidad poblacional y una gran dispersión geográfica, lo que dificulta la construcción y el mantenimiento de redes centralizadas. Por otro lado, las localidades rurales pequeñas agrupadas con hasta 2000 habitantes presentan el menor déficit, con solo el 7,1% lo que afecta a unos 160000

TABLA 1.1: Condiciones de déficit de servicio de agua potable

Categoría de localidad	Población [millones]	Déficit de acceso al agua potable segura [%]
Zonas rurales dispersas	1,2	37,6
Localidades rurales agrupadas hasta 2,000 habitantes	2,3	7,1
Localidades urbanas de entre 2000 y 100000 habitantes	7,9	14,8
Grandes aglomeraciones urbanas de más de 100000 habitantes	35,6	17,5
Total	47,0	20,1

habitantes. Estas localidades suelen contar con sistemas comunitarios de agua potable, gestionados por cooperativas, asociaciones o municipios, que brindan un servicio de calidad y asequible.

En el caso de las localidades urbanas de entre 2000 y 100000 habitantes, el déficit de acceso al agua potable segura es del 14,8 %, lo que afecta aproximadamente a 1,2 millones de habitantes. Estas localidades suelen tener un servicio de agua potable prestado por empresas públicas o privadas, que en algunos casos presentan problemas de calidad, continuidad o tarifas.

Por último, en el caso de las grandes aglomeraciones urbanas de más de 100000 habitantes, el déficit de acceso al agua potable segura es del 17,5 %, lo que afecta a unos 6,2 millones de argentinos. Estas aglomeraciones concentran al 70 % de la población y presentan una gran diversidad de situaciones, desde zonas con servicios de agua potable de alta calidad y cobertura, hasta zonas con un servicio deficiente o inexistente, especialmente en los barrios populares. En zonas urbanas que no incluyen barrios populares, el 10 % de los hogares carece de acceso a agua potable segura, una situación que ha permanecido constante durante la última década. Por otro lado, en los barrios populares, el déficit de servicio es alarmante, alcanzando un 88,4 %. Esta disparidad en el acceso al agua potable segura es un desafío significativo que requiere atención y soluciones adecuadas.

1.3. Redes de Distribución de Agua Potable

Los sistemas de suministro de agua son infraestructuras esenciales que abastecen de agua a diversos usos y sectores, incluyendo centros urbanos, industrias y comunidades rurales. La historia de estas construcciones se remonta a la antigüedad, con una notable expansión durante el Imperio Romano, cuyos avances tecnológicos y estándares de calidad dominaron por más de un milenio tras la caída del Imperio Romano de Occidente.

El progreso en la ingeniería hidráulica se reactivó en Europa durante el Renacimiento tardío, destacándose en naciones como Italia, Francia e Inglaterra. En la actualidad, ejemplos destacados de sistemas de distribución de agua se encuentran alrededor de todo el mundo. Por ejemplo, el Acueducto Catskill que es una arteria clave para Nueva York (EE.UU.), proporciona aproximadamente 1500000 m^3 de agua diariamente. Mientras que el Acueducto del Río Colorado recorre 389 km de longitud compuesto por canales, túneles, conductos enterrados y sifones, para transportar agua potable desde el río Colorado hasta el sur de California.

Un acueducto moderno para el suministro de agua potable consta de varios componentes esenciales, los cuales se ilustran en la Figura 1.1, estos incluyen:

- Tomas de agua: permiten la captación o extracción de agua del ciclo natural. Dependiendo de si el agua proviene de fuentes superficiales, como ríos y lagos, o subterráneas, como acuíferos, sus características varían significativamente.
- Plantas de tratamiento: ubicadas aguas abajo de las tomas, tienen como función la eliminación de contaminantes para producir agua apta para consumo humano, actividades industriales, entre otros.
- Tuberías de transmisión primaria: conducen el agua desde la fuente hasta la proximidad de los usuarios finales.
- Instalaciones de almacenamiento: comprenden tanques o reservorios diseñados para proveer reservas de agua que compensen cualquier interrupción en el suministro y satisfagan la demanda durante los períodos de mayor consumo.

- Redes de distribución: generalmente con diseños mallados, suministran agua a todos los usuarios.

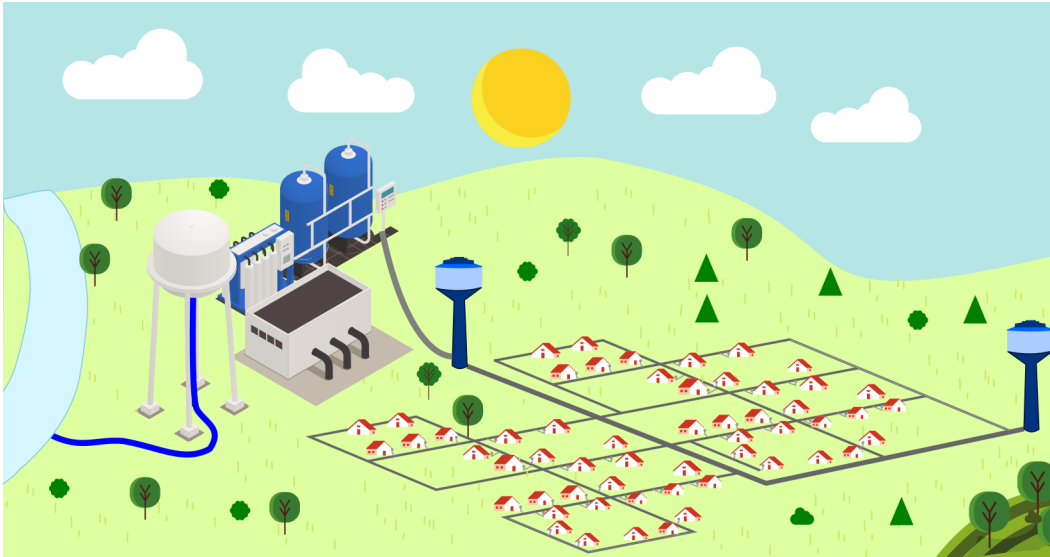


FIGURA 1.1: Representación de los componentes esenciales de una red de distribución de agua potable

Es factible clasificar las redes de distribución de agua según el diseño requerido para cada situación específica. La clasificación más elemental divide estas redes en dos categorías principales: redes ramificadas y redes malladas (o redes en bucle). Las redes ramificadas se caracterizan por extenderse desde un punto de origen, como un depósito o una bomba, hasta los puntos de consumo finales. Este diseño se asemeja a la estructura de un árbol, con una fuente central de la que se bifurcan múltiples ramas. Un ejemplo de esta tipología se puede observar en la Figura 1.2(A), que es la representación de la red de distribución de agua de la ciudad de Kumasi en Ghana, África. En contraste, las redes malladas presentan una configuración reticular, formando circuitos cerrados de tuberías que permiten múltiples caminos para el flujo del agua. Un ejemplo de red mallada es la propuesta por Farmani et al. (2004) que se representa en la Figura 1.2(B). La red Exnet es una red académica que consta de configuraciones redundantes triangulares y trapezoidales.

Desde una perspectiva hidráulica, las redes ramificadas facilitan la determinación de los caudales que fluyen a través de las tuberías basándose en los consumos registrados en la red. Por otro lado, en las redes malladas, la distribución de caudales está influenciada

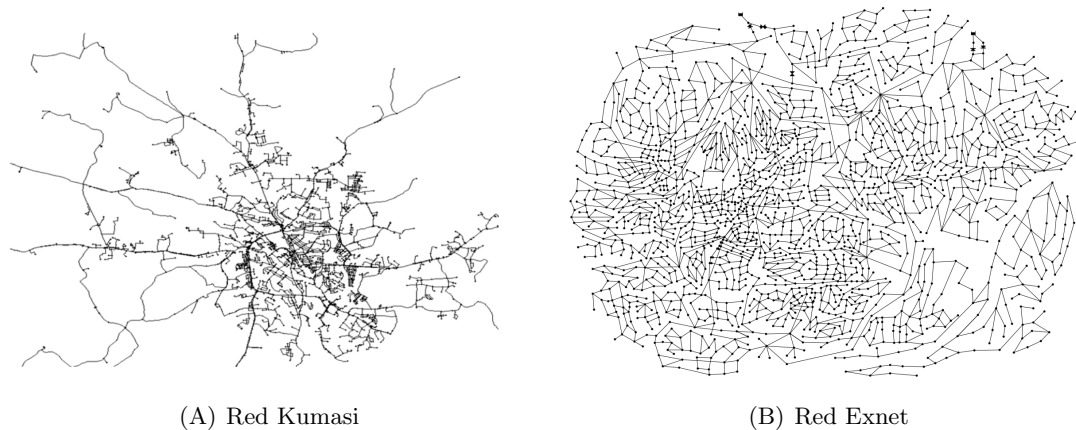


FIGURA 1.2: Ejemplos de redes

por las características hidráulicas de las tuberías. Por lo tanto, los datos de consumo por sí solos no brindan información suficiente para estimar los caudales, ya que es imprescindible considerar la resistencia y capacidad de cada segmento de la red.

Las redes malladas ofrecen una distribución de presiones más eficiente en toda la red, lo que se traduce en un mayor grado de satisfacción en el suministro a los consumidores. Esto se debe a que el agua dispone de múltiples rutas para llegar a su destino, lo que constituye una ventaja significativa en caso de rotura de algún componente de la red.

1.4. Sectorización de Redes de Distribución de Agua Potable

Tradicionalmente, la gestión de las redes de agua potable ha adoptado un enfoque pasivo, caracterizado por una respuesta reactiva ante incidencias. Las acciones pasivas suelen ser de naturaleza rutinaria, orientadas a mantener la operatividad del sistema, resolviendo problemas una vez ocurridos y sin necesariamente procurar la optimización de su rendimiento. En contraposición, un enfoque activo implica una gestión proactiva, enfocada en la mejora continua del sistema para maximizar su eficiencia y rendimiento, anticipándose a posibles problemas o minimizando impactos adversos imperceptibles.

El control de la calidad del agua, la reducción de fugas y la gestión de la presión son tareas difíciles debido al tamaño de las redes de agua y la naturaleza no lineal del sistema hidráulico. Por esta razón, los investigadores se centran en el desarrollo e implementación de estrategias proactivas, apoyadas en tecnologías actuales de monitoreo y control, como la implementación de áreas de medición de distrito (DMAs, por su sigla en inglés).

El concepto DMAs surgió en el Reino Unido a finales de los años ochenta, representando un avance significativo en la gestión de redes de distribución de agua potable. Este concepto se desarrolló con el objetivo de optimizar el control sobre las pérdidas de agua y elevar la calidad del servicio prestado. Las DMAs se definieron inicialmente como áreas discretas dentro de un sistema de distribución de agua potable, generalmente delimitadas mediante el cierre de válvulas o la desconexión completa de tuberías, permitiendo así la medición precisa del volumen de agua que entra y sale de un área ([Department of the Environment, 1980](#)). La Figura 1.3 muestra un ejemplo de una red sectorizada, donde cada DMA, identificado por un color distinto, está limitado por elementos de aislamiento (válvulas en rojo) o de medición (caudalímetros en celeste).

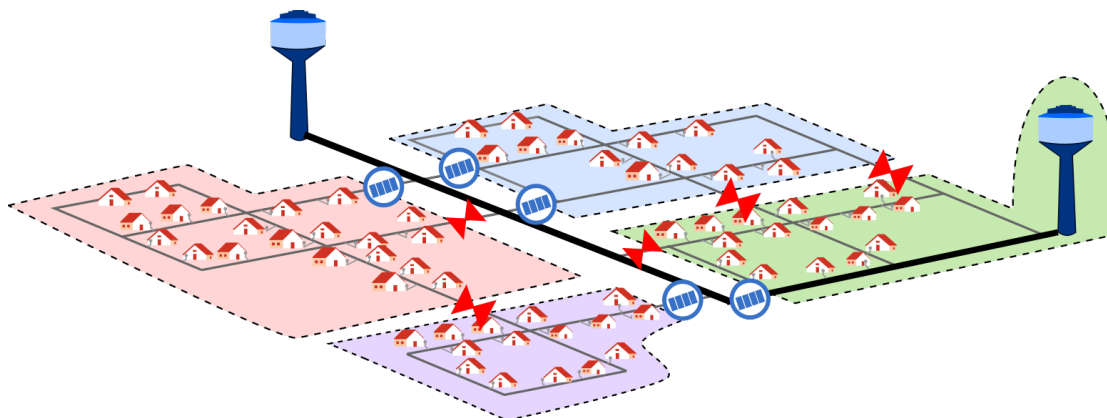


FIGURA 1.3: Esquema de sectorización de red de distribución de agua potable en DMAs

Desde 1990, la industria hídrica británica ha sostenido que la implementación de DMAs no debe ser vista como una solución inmediata, sino más bien como un compromiso a largo plazo entre los responsables de la toma de decisiones y las empresas proveedoras de este servicio. La introducción del concepto de DMAs se propuso inicialmente como una herramienta para mitigar las pérdidas por fugas en la red. Sin embargo, establecer los límites para la sectorización efectiva de las DMAs constituye un desafío complejo,

dado que requiere la evaluación de factores económicos e hidráulicos dentro de la red de distribución de agua, como la gestión de un elevado número de variables y restricciones en el sistema (Saldarriaga et al., 2019).

La sectorización y la segmentación de redes de agua son términos relacionados aunque pueden tener matices diferentes según el contexto. La sectorización se centra en la creación de sectores independientes para mejorar la operación y el mantenimiento, mientras que la segmentación abarca diversas estrategias de subdivisión de la red con objetivos específicos. Ambos conceptos están dirigidos a la gestión eficiente de sistemas de distribución de agua potable para garantizar un suministro confiable y de alta calidad. En esta tesis, ambos términos se utilizarán de manera indistinta.

El objetivo primario de la sectorización es mejorar la gestión operativa y administrativa de los sistemas hidráulicos de las redes de agua potable. Posee las siguientes ventajas:

- planificación de sistemas de medición eficientes;
- mantenimiento correctivo;
- creación de zonas de control de presión;
- identificación y reducción de fugas;
- control de flujos para mejorar el balance hídrico;
- control de la propagación de contaminantes peligrosos;
- mejora en la rapidez y calidad de las reparaciones de fugas;
- control de la calidad del agua;
- planificación de inversiones y facturación de los usuarios;
- mejora de la eficiencia hidráulica de la red;
- reducción de las pérdidas de agua y el consumo de energía;
- aumento de la sustitución y rehabilitación de tuberías.

En los casos específicos donde se logran DMAs completamente aisladas, se obtiene como ventaja adicional una reducción en el riesgo de contaminación accidental o maliciosa de toda la red de agua, lo que proporciona una protección efectiva del sistema (Di Nardo et al., 2014). El diseño de DMAs aisladas también es útil para la programación de mantenimiento y reparación, ya que permite a las empresas reconocer fácilmente y hasta predecir las zonas afectadas y hasta desconectar solo las áreas de la red afectadas. Ferrari et al. (2014) plantean que la sectorización es útil para monitorear las fugas en cada DMA y puede realizarse mediante el análisis del flujo mínimo nocturno debido al aislamiento completo o la medición de flujos en varios puntos de control clave de la red.

Las DMAs pequeñas facilitan la identificación de fugas de bajo caudal aunque presentan desventajas y costos adicionales en comparación a las de mayor tamaño ya que requieren más cierres de tuberías y la instalación de un mayor número de válvulas entre DMAs (Scarpa et al., 2016). Por lo tanto, se debe determinar un número óptimo de DMAs para hacer un buen uso de los elementos de medición y aislación y equipos de detección de fugas.

Finalmente, vale la pena señalar que rediseñar una red de agua potable para incluir DMAs es una tarea compleja que, si no se realiza cuidadosamente, puede conducir a problemas de suministro, reducción de confiabilidad y disminución de la calidad del agua (Ferrari et al., 2014). Por estas razones, es importante comparar el rendimiento entre el sistema mallado original y su versión sectorizada. Igualmente se ha demostrado que es posible definir DMAs sin comprometer la confiabilidad en el suministro de agua o la calidad del agua en el sistema (Saldarriaga et al., 2019).

En contraste, la principal desventaja de las DMAs es que la posibilidad de satisfacer las demandas ante fallas de la red puede disminuir porque hay menos tuberías disponibles para conectar las fuentes de suministro y los nodos de demanda. Este hecho puede tener un impacto negativo en caso de emergencias, como por ejemplo, frente a incendios, roturas de tuberías, fallas en el sistema de control y/o fallas en estaciones de bombeo (Scarpa et al., 2016).

No hay una única solución para el diseño de las DMAs debido a la amplia variedad de topologías y diversas características hidráulicas de las redes. Uno de los factores

determinantes para el diseño es el tipo de abastecimiento que tenga el sistema hidráulico. En los casos en que las redes posean una única fuente, el diseño de las DMAs se realiza con el uso de caudalímetros y con todas sus áreas interconectadas. Sin embargo, en las redes con múltiples fuentes, en algunos casos, se puede proponer el diseño óptimo de DMAs autónomas, donde cada DMA es aislada del resto de la red mediante válvulas de aislamiento en tuberías óptimamente seleccionadas. La partición se concibe, entonces, identificando una o más fuentes por DMA.

1.4.1. Estado actual del conocimiento

Históricamente, la segmentación de redes de suministro de agua potable se ha abordado mediante un método de “prueba y error”, confiando en la intuición del diseñador. Este enfoque se apoyaba en el uso de simuladores hidráulicos y reglas empíricas, como la longitud máxima de tuberías por sector o valores recomendados para determinadas propiedades (Charalambous, 2005; MacDonald and Yates, 2005; Rogers, 2005). Sin embargo, esta metodología resultaba ser un proceso tedioso que podía prolongarse durante semanas o incluso meses. Aunque este enfoque podría resultar adecuado para satisfacer ciertas necesidades prácticas de la ingeniería, los resultados dependen en gran medida de elecciones subjetivas y, raramente, se alcanza una solución final óptima. Además, estos procedimientos resultan ineficientes para su aplicación en redes de gran tamaño, donde la incorporación de nuevos dispositivos puede alterar sensiblemente los parámetros operativos de toda la red.

Para la sectorización de las redes se han propuesto diferentes criterios de diseño como cantidad de nodos, longitud de cañería, consumo por DMA entre otros. Una variedad de estudios e informes técnicos han propuesto métodos y pautas generales para el diseño de DMAs (Department of the Environment, 1980; Farley et al., 2001; Butler, 2000; Morrison et al., 2007; Baker, 2009; Bianchotti et al., 2021a). Algunas recomendaciones se enfocan en establecer el tamaño óptimo de las DMAs. Sin embargo, los autores no logran establecer fehacientemente un tamaño debido a que los rangos pueden variar entre 1000 y 3000 usuarios (Department of the Environment, 1980) o entre 2500 y 12500 habitantes (Butler, 2000). También pueden encontrarse recomendaciones para considerar factores

como los límites de la edad del agua y la presión en los nodos, tanto en condiciones normales como en situaciones de emergencia, aunque ninguno de estos parámetros ha demostrado ser universalmente aceptado para poder ser aplicado en todas las redes.

[Swamee and Sharma \(1990\)](#) desarrollaron un algoritmo para dividir la red con múltiples fuentes de suministro en función del área abastecida por cada una de ellas, el avance que presentaba es que permitía reducir los costos de diseño y los tiempos de cálculo. La metodología consiste en determinar la direccionalidad del flujo en cada tubo desde las fuentes de suministro hasta los nodos de consumo. Luego, analizar todos los caudales que forman parte de cada trayecto y seleccionar como límite el de menor valor, para dividir la red.

[Tzatchkov et al. \(2006\)](#) utilizaron teoría de grafos para identificar el número de sectores independientes en una red, el conjunto de nodos que pertenece a cada sector, el conjunto de nodos desconectados y la contribución de cada fuente sobre el consumo de cada nodo. Los algoritmos están implementados en un sistema informático basado en AutoCAD. A su vez, [Kadu et al. \(2008\)](#) presentaron un algoritmo genético modificado con reducción en el espacio de búsqueda que utiliza aleatoriamente operadores básicos y sus derivadas.

[Herrera et al. \(2010\)](#) utilizan un enfoque basado en multiagentes que aprovecha la naturaleza distribuida de las redes de agua potable. Esta metodología ofrece una solución adecuada para el paradigma de las DMA a través de grupos que permiten que las condiciones para estos grupos se conviertan en pequeñas redes de suministro de agua. La metodología establece de antemano el número de DMAs a construir, relacionándolos con las fuentes de abastecimiento de la red, que servirán como semillas para las áreas correspondientes. Los agentes inician un proceso de agrupamiento mediante exploración, sondeando sus nodos vecinos y verificando la probabilidad de que se asimilen al mismo DMA.

[Di Nardo et al. \(2009\)](#) proponen un sistema de soporte de decisiones para identificar la posición óptima de las tuberías basado en procedimientos metaheurísticos para dividir un sistema de suministro de agua recurriendo a principios de teoría de grafos. Este conjunto de tuberías se obtiene a partir de un análisis preliminar de los patrones mínimos de disipación de la carga hidráulica, calculados desde cada fuente hasta cada nodo de

la red de agua mediante el cierre de las tuberías. Mientras que [Di-Nardo et al. \(2011\)](#) utilizaron la teoría de grafos y un algoritmo genético para identificar rutas de potencia disipada mínima desde las fuentes de agua hasta cada nodo de demanda y definir áreas de medición independientes.

[Perelman and Ostfeld \(2011\)](#) desarrollaron un algoritmo que divide el sistema en áreas utilizando varias herramientas de teoría de grafos. El procedimiento de sectorización se genera en cuatro etapas: (1) mapeo del sistema de distribución de agua, (2) identificación de clústeres conectados fuertemente (3) formación de clústeres conectados débilmente, (4) estructuración de clústeres. Lo que busca es que las áreas resultantes creen una relación de conectividad que simplifica las interconexiones del sistema.

[Vegas Niño \(2012\)](#) evaluó distintos criterios para la creación de los árboles de mínimo costo. Entre los criterios de sectorización utilizados se encontraron número máximo de acometidas en cada sector, número máximo de abonados estimado en cada sector, demanda máxima, longitud de la red, y estratos de presión. El árbol obtenido a partir del peso del caudal asociado a cada tubería junto con el criterio para agrupar sectores por el número máximo de abonados, dieron los mejores resultados.

[Gomes et al. \(2012\)](#) utilizan un algoritmo de recocido simulado para identificar los puntos de entrada óptimos de las DMAs, las necesidades de la red en términos de refuerzo o reemplazo y el tipo, ubicación y configuración más ventajosos de válvulas reguladoras de presión. La función objetivo del algoritmo es la diferencia entre los beneficios económicos por la reducción de las fugas de agua y el coste de implementar la red sectorizada.

[Diao et al. \(2013\)](#) proponen un enfoque para crear automáticamente límites de DMAs basados en la estructura de la comunidad de los sistemas de distribución de agua. La estructura de la comunidad se logra mediante la agrupación de vértices en comunidades de tal manera que haya una mayor densidad de aristas dentro de las comunidades que entre ellas. Para su verificación, el método se probó en un sistema de distribución del mundo real y el resultado se comparó con un diseño de DMAs diseñado manualmente.

[Scibetta et al. \(2014\)](#) proponen un enfoque automatizado para subdividir la red, que solo requiere caudales circulantes en la red. El enfoque divide con éxito la red en un número

aceptable de DMAs, donde cada DMA resultante se caracteriza por un bajo número de enlaces externos y por un número adecuado de usuarios.

[Ferrari et al. \(2014\)](#) proponen una metodología para diseñar un número dado de DMAs en redes de distribución de agua malladas, basado en la teoría de grafos y teniendo en cuenta algunos criterios como: el tamaño máximo y mínimo recomendado para una DMA, la conectividad de cada DMA con la fuente de suministro de agua y la ausencia de enlaces entre las áreas. El algoritmo permite la creación de DMAs independientes entre sí. Aplica un procedimiento de bisectriz recursiva para crear el diseño, mientras que utiliza un algoritmo de recorrido de grafos para verificar si cada área puede ser alcanzado desde la fuente de agua y la conectividad entre los nodos.

[Di Nardo et al. \(2014\)](#) proponen una metodología para sectorizar redes donde cada DMA posea una o más fuentes de abastecimiento. La metodología se basó en principios de teoría de grafos donde un algoritmo de búsqueda en profundidad busca ramas independientes y consideraciones energéticas para minimizar la potencia disipada mediante el empleo de un algoritmo genético.

[Giustolisi et al. \(2014\)](#) presentan el índice de modularidad clásico, desarrollado en teoría de redes y posteriormente, lo adaptan y modifican para las redes de agua potable. Además, presentan y discuten una estrategia de optimización multiobjetivo para la segmentación óptima, también utilizando una red de prueba real. El marco de optimización se basa en la maximización del índice basado en la modularidad orientado a las redes de agua potable frente a la minimización del costo de los dispositivos a instalar para diseñar los sectores de la red.

[Campbell et al. \(2014\)](#) desarrollan un método que utiliza conceptos derivados de la Teoría de Redes Sociales como centralidad y detección de comunidades, junto con criterios hidráulicos y energéticos para obtener las subdivisiones de la red de agua potable. La metodología planteada considera que existen tuberías que no deben incluirse en el esquema de sectorización. Esta metodología conlleva dos beneficios importantes: en primer lugar, es aplicable a redes que dependen de un ramal principal y, en segundo lugar, considera el conocimiento técnico del personal de la empresa de servicios de agua (para establecer las tuberías que no deben ser consideradas).

[Hajebi et al. \(2015\)](#) desarrollan una metodología para el aislamiento de DMAs con al menos una fuente para cada área, buscando un impacto negativo mínimo en requisitos estructurales como conectividad de la red y limitaciones del tamaño del sector, y requisitos hidráulicos como satisfacción de la demanda del cliente, presión, confiabilidad de la red, eficiencia energética, velocidad del agua en las tuberías, diferencias mínimas de elevación nodal dentro de los sectores y calidad del agua. El algoritmo divide la red de agua en sectores aislados sin agregar componentes a la red. Los criterios de optimización y sus prioridades pueden especificarse para cada caso, lo que hace que el método sea de propósito general. Los resultados basados en simulación muestran que el algoritmo generalmente logra sus objetivos de diseño con una disminución mínima en los criterios de rendimiento de la red.

[Castro-Gama et al. \(2016\)](#) presentan un método que busca sectorizar la red con el objetivo de mejorar la eficiencia energética en la gestión de sistemas de suministro de agua. La innovación de este enfoque radica en la aplicación de teoría de grafos y optimización multiobjetivo al sistema de distribución de Milán, que cuenta con 26 estaciones de bombeo.

[Zhang et al. \(2017\)](#) utilizan teoría de redes complejas y optimización multiobjetivo, para la partición de redes de distribución de agua. Este enfoque, mapea una red de distribución de agua en un grafo no dirigido ponderado y mide su fuerza mediante una modularidad extendida por una estrategia de caminata aleatoria y un algoritmo heurístico. Determina las tuberías de límite entre las DMAs aplicando un algoritmo evolutivo para minimizar el número de tuberías de límite y maximizar la uniformidad de la presión de la red y la edad del agua.

[Liu and Han \(2018\)](#) proponen una metodología de tres pasos para el diseño de DMAs basada en el algoritmo de agrupamiento espectral y la teoría de grafos. El primer paso consiste en calcular los vectores propios no triviales basados en un grafo ponderado de la red de distribución de agua. El segundo paso realiza el agrupamiento óptimo de nodos como DMAs mediante agrupamiento espectral. El tercer paso implica determinar la ubicación de medidores y válvulas mediante un método heurístico. Luego utilizan un método de decisión multicriterio para determinar la mejor solución de DMAs.

[Zhang et al. \(2019\)](#) proponen un método de sectorización de optimización multiobjetivo basado en una consideración integral de la hidráulica, la calidad del agua y la economía. Este método se basa en el algoritmo genético de clasificación no dominada (NSGA-II), que es un algoritmo heurístico para la optimización multiobjetivo para obtener los esquemas óptimos. Además, consideran que la experiencia humana también debe ser considerada en el proceso de optimización y recomiendan también identificar previamente la red principal de tuberías y excluirla del proceso de creación de los sectores.

[Chatzivasili et al. \(2019\)](#) presentan un enfoque híbrido de dos etapas para proporcionar una división de una red de agua potable en DMAs, mejorando tanto la edad del agua como la presión. La primera etapa tiene como objetivo dividir la red en áreas más pequeñas a través del método de particionamiento geométrico, que se basa en la bisección coordinada recursiva. En la segunda etapa se aplica el modelo de mezcla t de Student a cada área, proporcionando una ubicación óptima de las válvulas de aislamiento y separando la red en DMAs.

[Giudicianni et al. \(2020\)](#) proponen una metodología para dividir automáticamente un sistema hidráulico en DMAs autoadaptativas de diferentes tamaños en respuesta al impacto de un aumento de demanda como evento aislado, no programado. El método utiliza teoría de redes complejas y se basa en los componentes clave del trazado original combinando sus características topológicas con los avances en la modelización y optimización de redes. Es decir, buscan reutilizar los activos de la partición estática para recuperar el rendimiento hidráulico del sistema.

[Liu and Lansey \(2020\)](#) abordan un conjunto multifacético de objetivos para desarrollar un método de diseño de DMA de múltiples fases. En la primera fase de la metodología trazan la red de tuberías de alimentación determinando los grupos de nodos y las tuberías de límite que maximizan la disimilitud de presiones y modularidades entre grupos y minimizan el número de cortes entre grupos mientras se define el número de DMAs más cercano al número deseado. En la segunda fase de la metodología, identifican las tuberías de alimentación secundarias de las DMAs minimizando el número de tuberías de alimentación secundarias y maximizando la energía excedente nodal mientras se mantiene la presión deseada. Además realizan un análisis postoptimización que compara el

rendimiento de las soluciones de Pareto en función de su disponibilidad, calidad del agua y fuga diaria.

Vasilic et al. (2020) desarrollaron un algoritmo que se basa en la teoría de grafos para la identificación de componentes fuertemente conectados y su agregación en clústeres basados en un índice de uniformidad de red. Los principales criterios de diseño para la sectorización buscan minimizar la inversión de costos en el equipamiento necesario para la creación de DMAs (caudalímetros y válvulas de aislamiento), mientras se mantiene la eficiencia operativa existente de la red.

Brentan et al. (2022) abordan el diseño de DMA mediante (1) la propuesta de un algoritmo k-means modificado para la partición, (2) el uso de una optimización de enjambre de partículas multiobjetivo para colocar adecuadamente los dispositivos de particionamiento, (3) el uso del proceso de jerarquía analítica difusa para ponderar las cuatro funciones objetivo consideradas, y (4) el uso de técnicas de orden de preferencia basadas en la similitud con la solución ideal para clasificar las soluciones de Pareto y apoyar la toma de decisiones.

Sharma et al. (2022) presentan un enfoque multifase para el diseño óptimo de DMA que involucra: una combinación de un algoritmo de Newman rápido para identificar grupos iniciales; un algoritmo genético de clasificación no dominado (NSGA-III) para obtener un conjunto de configuraciones de DMA buenas mientras se consideran varios objetivos simultáneamente; y un método de toma de decisiones de múltiples atributos para encontrar la configuración de DMA más adecuada de un conjunto de soluciones alternativas factibles basadas en la preferencia dada a cada objetivo.

1.5. Hipótesis

Mediante la ubicación estratégica de válvulas y caudalímetros es posible segmentar una red de distribución de agua potable en DMAs optimizando simultáneamente objetivos de gestión tales como la creación de comunidades autónomas capaces de operar de forma independiente o la interconexión de comunidades para permitir un seguimiento preciso de los flujos en cada punto de interacción entre DMAs.

La sectorización óptima en una sola etapa resulta computacionalmente prohibitiva, incluso para redes de tamaño medio, debido a la necesidad de verificar que se satisfagan las restricciones hidráulicas para cada posible solución. Para abordar este desafío, se propone en esta tesis el desarrollo de un método de diseño de dos etapas. En la primera etapa, se examinarán dos índices para detectar las estructuras óptimas de comunidades dentro de una red. En la segunda etapa, se determinará la ubicación óptima de los elementos de aislación en la estructura previamente definida. Se evaluarán distintas métricas con el objetivo de determinar cuál describe mejor el desempeño del sistema hidráulico sectorizado. Para abordar estos problemas de optimización combinatoria del tipo NP-hard¹, se implementará un algoritmo heurístico y un algoritmo metaheurístico.

1.6. Estructura de la Tesis

La tesis se estructura de siete capítulos, cada uno enfocado en un aspecto crucial del diseño de DMAs. El primer capítulo contextualiza la temática central, ofreciendo una visión general del panorama global, estableciendo objetivos específicos y explorando los avances recientes en el estado del arte. Además, aborda los desafíos y las problemáticas aún vigentes en el campo. El segundo capítulo detalla el marco teórico, proporcionando los conceptos clave necesarios para el entendimiento del desarrollo de la tesis. Se abordan los sistemas de resolución para sistemas hidráulicos, las métricas utilizadas para caracterizar las redes y los métodos de optimización aplicados. En el tercer capítulo se presenta la metodología desarrollada. Los capítulos cuarto y quinto se dedican al desarrollo de las fases de diseño de las DMAs, aplicándolos a distintas configuraciones de redes. Los capítulos sexto y séptimo describen la implementación práctica de estos diseños en una red de gran tamaño en Argentina. Finalmente, el octavo capítulo sintetiza las conclusiones derivadas del trabajo realizado y propone futuras líneas de investigación y desarrollo en el campo de la gestión de redes de agua potable.

¹NP-hard es el acrónimo en inglés de Nondeterministic Polynomial-time hard

Capítulo 2

Marco teórico

En este segundo capítulo se presenta el marco teórico que proporciona las bases para el desarrollo de la metodología de sectorización propuesta en esta tesis. Se inicia examinando diferentes métodos propuestos para la solución de sistemas hidráulicos y luego se presenta el método empleado en el software EPANET, una herramienta muy utilizada para la simulación de redes de distribución de agua y que fue adoptada para la resolución de los sistemas hidráulicos de esta tesis. Además, se explora cómo la teoría de grafos puede ser aplicada para representar las redes de agua, y se describen las diferentes métricas que serán fundamentales en la implementación de las metodologías propuestas. Por último, se describen los algoritmos de optimización utilizados.

2.1. Resolución de Sistema Hidráulicos

Con el paso de los años se ha observado un desarrollo constante en los diversos algoritmos que buscan resolver el conjunto de ecuaciones, tanto lineales como no lineales, que rigen la hidráulica en estado estacionario de las redes de distribución de agua. La literatura científica se encuentra abundantemente poblada de diferentes enfoques que fueron propuestos para abordar la resolución de estos sistemas. Entre las notables contribuciones resaltan los trabajos pioneros de [Martin and Peters \(1963\)](#), [Shamir and Howard \(1968\)](#),

Wood and Charles (1972), así como las investigaciones llevadas a cabo por Isaacs and Mills (1980) y Todini and Pilati (1988).

Estos diferentes enfoques se pueden clasificar en dos grupos principales: los métodos locales, que fueron desarrollados tempranamente (por ejemplo, Cross (1936)), abordaban la resolución de una ecuación a la vez. Por otro lado, los métodos globales son más recientes y enfocan la resolución de las ecuaciones de forma simultánea utilizando el método de linealización de Newton-Raphson (NR) o el enfoque de aproximación sucesiva de la teoría lineal (LT) para abordar las ecuaciones no lineales del sistema. Entre los ejemplos del enfoque NR se encuentran el método de cabeza propuesto por Martin and Peters (1963), los métodos de flujo y bucle desarrollados por Wood and Rayes (1981) y el algoritmo de gradiente global presentado por Todini and Pilati (1988). Por otro lado, solo dos algoritmos (Wood and Charles, 1972; Isaacs and Mills, 1980) utilizan el enfoque LT, mientras que un tercer enfoque desarrollado por Gupta and Prasad (2000) utiliza un enfoque no lineal que podría clasificarse como LT en el espacio logarítmico.

Durante los últimos años de la década de 1960 y principios de la década de 1970, se produjo un período fértil en el desarrollo de muchos de estos algoritmos. A principios de los años 80, muchos de los programas de investigación académica (por ejemplo, Fowler, Jepsson, Shamir y Howard, Wood, entre otros) fueron gradualmente convertidos en aplicaciones comerciales de software que se promovieron y comercializaron a través de universidades y, en algunos casos, mediante empresas medianas e incluso grandes corporaciones. Algunas de las contribuciones más destacadas de la industria en el mercado fueron WATSIM, desarrollado por Boeing Computer Services en 1982, y KYPIPE, desarrollado en la Universidad de Kentucky, capitalizando una década de investigación del Centro de Desarrollo de Software de la facultad de ingeniería de dicha universidad. En ese momento, los modelos comenzaron a extenderse a sistemas de mayor complejidad hidráulica, incluyendo bombas, válvulas de control, simulación en período extendido y análisis de calidad del agua.

Durante este período, agencias gubernamentales como el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (USACE) y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos

(U.S. EPA) también desarrollaron sus propias aplicaciones. En 1993, un grupo de trabajo liderado por Lewis Rossman de la U.S. EPA lanzó la primera versión pública del software EPANET. Este software proporcionó a los usuarios un modelo de distribución de agua de arquitectura abierta, completo y gratuito. Desde entonces, tanto la comunidad de investigación como la de aplicaciones han utilizado y adaptado este software. Es importante destacar que EPANET experimentó cambios significativos hasta el lanzamiento de la versión EPANET 2.2.0 en el año 2020. Estos cambios no solo incluyeron mejoras en la interfaz gráfica y en las herramientas de entrada de datos, sino también en sus métodos de cálculo y algoritmos.

EPANET es un software de dominio público que cuenta con una interfaz gráfica sencilla y de fácil uso. Además, su manual de usuario es completo y su código fuente es accesible, lo que facilita la incorporación de mejoras y la implementación de nuevas funciones tanto en la interfaz gráfica como en la librería de cálculo. Estas características hacen de EPANET el software más utilizado en todo el mundo para la elaboración de modelos hidráulicos y de calidad del agua, y el motivo por el cual fue seleccionado para estudio de los sistemas hidráulicos de la tesis.

2.1.1. Análisis DDA y PDA

Los sistemas de distribución de agua se pueden describir mediante un conjunto de ecuaciones que representan la conservación de masa y la conservación de energía. La conservación de masa establece que para cada nodo de la red la entrada total de agua debe ser igual a la salida total, teniendo en cuenta todas las tuberías conectadas al nodo. Por otro lado, la conservación de energía se aplica entre cada par de nodos conectados, estableciendo que la diferencia de carga hidráulica entre estos nodos debe ser igual a la pérdida de presión en el tubo que los une.

[Todini and Pilati \(1988\)](#) desarrollaron la representación del algoritmo global (GA) como una reformulación matricial de las ecuaciones de conservación de masa y energía. Suponiendo una red genérica con n_0 nodos fuente, n_n nodos y n_p tubos, las ecuaciones se expresan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\mathbf{A}_{pp}\mathbf{Q}(t) + \mathbf{A}_{pn}\mathbf{H}(t) &= -\mathbf{A}_{p0}\mathbf{H}_0(t) \\ \mathbf{A}_{np}\mathbf{Q}(t) - \mathbf{d}(\mathbf{H}_n, t) &= \mathbf{0}\end{aligned}\tag{2.1}$$

donde $t = 1, \dots, n_h$, donde n_h es el número total de pasos temporales del análisis hidráulico, $\mathbf{Q}(t)$ ($n_p \times t$) es la matriz de caudales de cada tubo de la red para cada paso de tiempo t , \mathbf{d} ($n_n \times t$) es la matriz de demanda de agua que es dato para cada instante de la operación de la red, el vector $\mathbf{H}_0(t)$ ($n_0 \times 1$) representa las cargas preasignadas (es decir, cargas hidráulicas en los nodos fuente, embalses o tanques) y $\mathbf{H}(t)$ ($n_n \times t$) es la matriz de cargas nodales desconocidas. Las matrices \mathbf{A}_{pn} ($n_p \times n_n$), \mathbf{A}_{p0} ($n_p \times n_0$) se obtienen a partir de la matriz de incidencia topológica \mathbf{A} . En particular, \mathbf{A}_{pn} ($n_p \times n_n$) se obtiene seleccionando las filas asociadas a los n_p tubos y las columnas asociadas a los n_n nodos de carga desconocidos y la matriz $\mathbf{A}_{np} = \mathbf{A}_{pn}^T$. \mathbf{A}_{p0} ($n_p \times n_0$) se obtiene extrayendo las filas asociadas a los n_p tubos y las columnas asociadas a los n_0 nodos de carga preasignados. La matriz \mathbf{A}_{pp} ($n_p \times n_p$) es una matriz diagonal cuyos elementos identifican las resistencias de las tuberías de la red.

Convencionalmente, el enfoque impulsado por demandas (DDA por su sigla en inglés) ha sido adoptado como técnica estándar para resolver el sistema de ecuaciones 2.1. Esta técnica supone que la demanda de agua a lo largo de las tuberías es conocida y puede ser agrupada en los nodos de la red. Por lo tanto, el comportamiento del sistema en términos de las variables de estado (presión y flujo) se obtiene resolviendo las ecuaciones (2.1) con valores de demanda fijos en los nodos. En este tipo de análisis, cualquier relación entre la demanda \mathbf{d} y la presión en los nodos se ignora y las demandas siempre son satisfechas incluso cuando las presiones nodales son iguales a cero (Reddy and Elango, 1989). Claramente, esta suposición es irreal y representa la principal deficiencia de los enfoques DDA. Sin embargo, si las redes de agua están operando bajo condiciones normales y sus condiciones estructurales son razonablemente conocidas, los modelos DDA pueden ser adoptados como herramienta de evaluación hidráulica.

En los sistemas reales a menudo se presentan condiciones anormales, y por ello se han

propuesto modelos que consideran la relación entre la presión y la demanda para reproducir el comportamiento en condiciones de falla. Los modelos impulsados por presiones (PDA por su sigla en inglés) suponen que si la presión nodal es mayor que la presión requerida, la demanda será satisfecha. Sin embargo, si la presión nodal es mayor que un nivel mínimo, pero menor que la presión requerida, alguna porción de agua será suministrada al nodo. Por último, si la presión nodal es menor que la presión mínima no se entregará agua al nodo. Para el enfoque PDA las ecuaciones matriciales 2.1 se complementan con el modelo de demandas propuesto por [Wagner et al. \(1988\)](#):

$$d_i^t = \begin{cases} d_i^{t*} & P_i^t \geq P_i^{treq} \\ d_i^{t*} \left(\frac{P_i^t - P_i^{t*}}{P_i^{treq} - P_i^{t*}} \right)^{1/2} & P_i^{t*} \leq P_i^t < P_i^{treq} \\ 0 & P_i^t < P_i^{t*} \end{cases} \quad (2.2)$$

donde d_i^t es la demanda entregada al nodo i a la hora t , P_i^t es la presión en el nodo, P_i^{treq} es la presión de servicio necesaria para satisfacer completamente la demanda requerida d_i^{t*} y P_i^{t*} es la presión por debajo de la cual no se puede suministrar agua.

2.2. Teoría de Redes y Modelos de Sistemas de Distribución de Agua Potable

Los sistemas complejos se organizan comúnmente en forma de redes, donde los nodos y enlaces están interconectados en un espacio determinado. Ejemplos de estas redes incluyen sistemas de transporte y movilidad, internet, redes de telefonía móvil, redes eléctricas, redes sociales, y redes neuronales. En estos casos, el espacio es relevante y la topología por sí sola no contiene toda la información del sistema. Por lo tanto, es crucial caracterizar y comprender la estructura y evolución de las redes espaciales en diversos campos. La teoría de redes pertenece al ámbito de las matemáticas y las ciencias de la computación, y se utiliza para modelar las conexiones y los procesos que se presentan en diferentes sistemas. Esta herramienta tiene múltiples aplicaciones en áreas tan diversas

como la informática, la química, la física, la logística, la investigación operativa, la ingeniería, la genética y la sociología, entre otras.

Una forma sencilla de representar una red es mediante un grafo. Un diagrama o grafo se suele representar por $G = (V, E)$, donde V es el conjunto finito de vértices y E es el conjunto de pares de vértices, denotados por (i, j) que se denominan enlaces. Si el enlace $e = (i, j)$ relaciona los vértices i y j , se dice que i y j son vértices adyacentes lo que significa que los vértices i y j están conectados directamente por el enlace e en el grafo. También se dice que el vértice i y el enlace e son incidentes, lo que significa que el vértice i es uno de los extremos del enlace e y, por lo tanto, está conectado a j a través de e .

Un grafo con n_n vértices y n_p enlaces puede ser descrito por su matriz de adyacencia. La matriz de adyacencia \mathbf{A}_{nn} es una matriz simétrica de tamaño $n_n \times n_n$ cuyos elementos representan las conexiones entre pares de vértices. Cada elemento A_{ij} vale 1 cuando hay un enlace que conecte los vértices i y j , en caso contrario el elemento A_{ij} vale 0.

La matriz de incidencia \mathbf{A}_{pn} caracteriza la topología de una red. Esta matriz está compuesta por n_p filas, cada una de las cuales corresponde a un enlace del sistema y contiene los elementos $\{1, -1\}$, y por n_n columnas que representan los vértices. Al momento de realizar la matriz de incidencia se la considerará como un grafo dirigido, considerando para cada enlace el nodo inicial con el valor 1 y el nodo final con un valor -1 .

2.2.1. Representación de redes de agua potable

Los sistemas de distribución de agua potable pueden ser representados como una red $G = (V, E)$ donde el conjunto de vértices V contiene los nodos de la red de agua que representan las conexiones de los consumidores, las uniones entre tuberías, las fuentes (depósitos o tanques) y los puntos de fugas. Asimismo, el conjunto de enlaces E contiene las líneas de la red que representan las tuberías, las válvulas y las bombas. Por ejemplo, una red con $n_p = 10$ tubos y $n_n = 7$ nodos de consumidores y $n_0 = 2$ tanques se representa en la Figura 2.1.

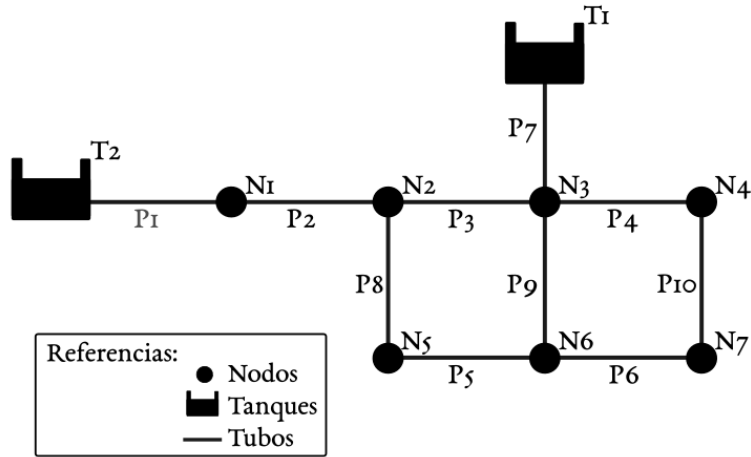


FIGURA 2.1: Esquema de red pequeña

Seguindo la topología de la Figura 2.1, se puede construir la correspondiente matriz de incidencia. En este caso, la matriz tendrá un total de 9 columnas (7 correspondientes a los nodos de la red y 2 a las fuentes de abastecimiento) y 10 filas que representan los 10 tubos presentes en la red. Tomando como ejemplo el tubo 2, que conecta el nodo 1 con el nodo 2, la fila 2 de la matriz A_{pn} se representa con un 1 en la columna 1 y un -1 en la columna 2, mientras que el resto de la fila se completa con ceros. Completando las siguientes filas con los restantes elementos, se obtiene la siguiente matriz:

$$A_{pn} = \begin{matrix} & \begin{matrix} N_1 & N_2 & N_3 & N_4 & N_5 & N_6 & N_7 & T_1 & T_2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \\ P_8 \\ P_9 \\ P_{10} \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Es importante tener en cuenta que los nodos que representan las fuentes se incorporan al final de la matriz de incidencia. En otras palabras, los tanques 1 y 2 se consideran en las columnas 8 y 9, respectivamente.

Para la matriz de adyacencia, en el caso de la Figura 2.1 se puede observar que el nodo

3 se encuentra conectado con los nodos 2, 4 y 6 y con el tanque T_1 , por lo tanto los elementos $A_{32} = 1$, $A_{34} = 1$, $A_{36} = 1$ y $A_{38} = 1$. Por ser una matriz simétrica se va a observar que los elementos A_{23} , A_{43} , A_{63} y A_{83} también serán igual a 1.

$$A_{nn} = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccccccc} \mathbf{N_1} & \mathbf{N_2} & \mathbf{N_3} & \mathbf{N_4} & \mathbf{N_5} & \mathbf{N_6} & \mathbf{N_7} & \mathbf{T_1} & \mathbf{T_2} & \\ \begin{array}{l} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{array} & \begin{array}{l} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{l} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{l} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{l} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{l} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{l} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{l} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{l} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{l} \mathbf{N_1} \\ \mathbf{N_2} \\ \mathbf{N_3} \\ \mathbf{N_4} \\ \mathbf{N_5} \\ \mathbf{N_6} \\ \mathbf{N_7} \\ \mathbf{T_1} \\ \mathbf{T_2} \end{array} \end{array} \end{array}$$

2.2.2. Partición de redes

En las últimas décadas, el interés en la partición y caracterización de redes en grupos de nodos o *clústeres* ha experimentado un notable crecimiento (Newman and Girvan, 2004; Xu et al., 2007; DiNardo et al., 2014; Castro-Gama et al., 2016; Bianchotti et al., 2018; Bonetti et al., 2021; Bianchotti et al., 2021b). La partición de redes es una tarea esencial para descubrir estructuras subyacentes en estas, implicando la división de la red en grupos de nodos enlazados por alguna propiedad que los distinga del resto. Dos enfoques principales se destacan en los métodos para la detección de estos grupos. El primero, basado en la partición de grafos, encuentra su aplicación principal en ciencias de la computación (Elsner, 1997; Fjällström, 1998). Un ejemplo de partición de grafos es la paralelización de un conjunto de tareas entre los procesadores de una computadora con el objetivo de optimizar tiempo y memoria en el proceso. En estos casos, se cuenta con información previa antes de la división, como la cantidad de procesadores y la capacidad de tareas que puede ejecutar cada procesador, lo que permite determinar el número y tamaño de los grupos en los que se espera dividir la red. El segundo enfoque se centra en la detección de estructuras de comunidades y se utiliza con mayor frecuencia en disciplinas como la sociología, la física o la matemática. Este segundo enfoque se aplica para estudiar grupos en redes sociales, biológicas o tecnológicas (Newman, 2004; Giustolisi and Ridolfi, 2014; Wasserman and Faust, 1994), donde el número y tamaño de

los grupos no están determinados ni aproximados de antemano, e incluso puede haber casos en los que la red no pueda dividirse.

Se han desarrollado diversos métodos para la partición de redes (Porter et al., 2009; Fortunato, 2010). Uno de los más empleados se enfoca en optimizar el índice de modularidad, propuesto por Newman and Girvan (2004). Esta métrica tiene como objetivo la detección de comunidades en una red, buscando identificar agrupamientos de nodos con una estructura significativamente diferente a la que se esperaría en una red completamente aleatoria. Newman and Girvan (2004) y Reichardt and Bornholdt (2004) utilizan la matriz de adyacencia \mathbf{A}_{nn} para definir el índice de modularidad Q_T que caracteriza topológicamente a la red:

$$Q_T = \frac{1}{2n_p} \sum_{ij} (A_{ij} - \gamma \frac{k_i k_j}{2n_p}) \delta(M_i, M_j) \quad (2.3)$$

donde $k_i k_j / 2n_p$ representa el número esperado de enlaces entre los vértices i y j si los enlaces se realizan de manera aleatoria, donde k_i y k_j son los grados de los vértices. Además M_i identifica el módulo i de la red, δ es la función delta de Kronecker ($\delta = 1$ sólo si $M_i = M_j$, es decir, los nodos i y j pertenecen al mismo módulo) y la suma corre sobre todos los posibles pares de nodos (i, j) , con $i \neq j$. El parámetro γ se denomina parámetro de resolución estructural y controla el número de comunidades. A menor valor de γ , habrá menos comunidades, lo que resulta en comunidades más grandes.

El uso de índices definidos exclusivamente sobre consideraciones topológicas no está justificado *a priori* en los sistemas hidráulicos ya que las redes de agua dependen fuertemente de parámetros físicos como las demandas, los diámetros de las tuberías y las presiones en los nodos. En consideración de estos parámetros físicos, Giustolisi and Ridolfi (2014) han definido un índice de modularidad característico Q_C que incorpora propiedades hidráulicas específicas. En función de una propiedad w_k la modularidad característica se puede expresar como (Newman, 2004; Giustolisi and Ridolfi, 2014):

$$Q_C = \frac{1}{2W} \sum_{ij} (W_{ij} - \gamma \frac{k_i^w k_j^w}{2W}) \delta(M_i, M_j) \quad (2.4)$$

donde W es la suma de las características de la propiedad seleccionada w_k con $k = (1, \dots, n_p)$, $W_{ij} = w_k$ es el elemento de la matriz de pesos que caracteriza al tubo k que conecta los nodos i y j , y $k_i^w(k_j^w)$ es el grado de las tuberías del nodo i al nodo j ponderado por la propiedad seleccionada. De manera similar a la modularidad topológica, valores de esta métrica cercanos a la unidad están asociados a estructuras de comunidades bien definidas y compuestas por tuberías con atributos similares.

2.3. Métricas

El diseño de la sectorización de la red representa un problema complejo que tradicionalmente se ha abordado mediante enfoques empíricos o realizado por prueba y error. Aunque se han propuesto técnicas heurísticas para la partición de redes existentes (Alvisi and Franchini, 2013; DiNardo et al., 2014; Castro-Gama et al., 2016; Bianchotti et al., 2019), no existe una estrategia general para la segmentación de redes de agua debido a la falta de una métrica universalmente aceptada que caracterice la estructura en comunidades o distritos de la red. En la siguiente sección se presentan los índices o métricas propuestas para el diseño de las DMAs.

2.3.1. Índice de resiliencia

En el diseño de redes de distribución de agua, el objetivo suele buscar que cada nodo tenga una presión mayor de la requerida para tener un excedente que permita la disipación de energía en caso de fallas. Este excedente puede utilizarse para caracterizar la resiliencia de la red, es decir, su capacidad intrínseca para superar fallas. Todini (2000) definió la resiliencia como la relación entre la potencia interna (P_{int}^*) necesaria para satisfacer la demanda total de la red y la potencia máxima (P_{max}^*) que se disiparía internamente para cumplir con las restricciones en términos de demanda y carga en los nodos:

$$I_R = 1 - \frac{P_{int}^*}{P_{max}^*} \quad (2.5)$$

donde $P_{int}^* = \gamma_a \sum_{F=1}^{n_0} Q_F H_F - \gamma_a \sum_{k=1}^{n_n} d_k^* h_k$, y $P_{max}^* = \gamma_a \sum_{F=1}^{n_0} Q_F H_F - \gamma_a \sum_{k=1}^{n_n} d_k^* h_k^*$ siendo las restricciones en términos de demanda d_i^* y carga mínima h_i^* requeridas en el nodo i . Asimismo h_i son las cargas de cada nodo i , Q_F y H_F son el caudal y la carga, respectivamente, del reservorio F , donde n_0 es el número de fuentes de la red y γ_a es el peso específico del agua. Al sustituir estas expresiones en la ecuación (2.5), el índice de resiliencia se expresa de la siguiente manera:

$$I_R = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} d_i^* (h_i - h_i^*)}{\sum_{F=1}^{n_0} Q_F H_F - \sum_{i=1}^{n_n} d_i^* h_i^*} \quad (2.6)$$

La sectorización de la red conlleva a una pérdida de redundancia en el diseño de la red, lo que resulta en una disminución de la resiliencia. Considerando que un índice de resiliencia alto indica una mayor capacidad de la red para hacer frente a posibles fallas hidráulicas, en este trabajo se propone minimizar la pérdida de resiliencia utilizando la siguiente expresión:

$$P_R = 1 - I_R \quad (2.7)$$

De esta manera, el índice de resiliencia puede ser utilizado para la evaluación indirecta de la fiabilidad del sistema hidráulico y permitir la comparación de diferentes escenarios (Puccini et al., 2016).

2.3.2. Coeficiente de Gini

Cuando se analiza la dispersión de un conjunto de datos, las medidas estadísticas tradicionales suelen centrarse en parámetros como la media o la mediana. Estos parámetros proporcionan información sobre la ubicación y la variabilidad de los datos, pero no necesariamente capturan la distribución completa de los mismos. En el año 1912 Corrado Gini publicó el libro “Variabilità e Mutabilità” (Gini, 1912) donde presentó por primera vez el índice que hoy se conoce como *Coeficiente de Gini*. El coeficiente de Gini se definió originalmente como una medida de la desigualdad de ingresos en una sociedad, aunque

también se lo utiliza como medida de cualquier distribución desigual. Consiste en un índice que varía entre 0 (igualdad absoluta) y 1 (desigualdad absoluta).

Existen diferentes maneras de definir el índice de Gini. Aquí se adoptará aquella que define el índice de Gini como la media aritmética de las diferencias absolutas entre todos los pares de ingresos, pero adaptada a las propiedades hidráulicas, es decir:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^c |y_i - y_j|}{2n^2\bar{y}} \quad (2.8)$$

donde y_i es la suma de la propiedad seleccionada que caracteriza a la comunidad i (por ejemplo, la demanda total de la comunidad i), c es el número de comunidades y \bar{y} es la media aritmética $\bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i/n$ calculada sobre los n nodos de la red.

2.3.3. Desviación estándar

La desviación estándar de una variable aleatoria se define como la raíz cuadrada de la varianza de esa variable y proporciona una medida de la dispersión de los datos alrededor de la media. Tiene una gran importancia en la inferencia clásica, sobre todo en relación con el estudio de la distribución normal como uno de los parámetros que determinan la distribución además de la media poblacional (Ruiz Espejo, 2017). La desviación estándar muestral cuantifica la dispersión de una muestra de tamaño n y se puede calcular como:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{n - 1}}. \quad (2.9)$$

donde y_i es el valor de la variable de interés definida, el subíndice i corresponde a la unidad i -ésima de una población n y la media poblacional \bar{y}_i .

La varianza toma valores entre cero y uno, un valor cercano o igual a cero, indica que en promedio los datos se encuentran más cercanos a la media; mientras que, un valor cercano o igual a uno, indica que en promedio éstos se encuentran lejanos (Ruiz Espejo, 2014). En estadística la desviación estándar es comúnmente utilizada para cuantificar intervalos de confianza o límites de dispersión.

2.4. Optimización

A lo largo de los siglos se han desarrollado metodologías para abordar problemas de optimización, lo que ha permitido el surgimiento de herramientas más complejas y potentes (Yang, 2010). Existen dos categorías principales de métodos de optimización: los métodos determinístico y los métodos metaheurísticos. Los métodos determinísticos abarcan enfoques analíticos y numéricos diseñados para encontrar un óptimo local dentro de un conjunto específico de alternativas. Entre estos métodos se incluyen la optimización lineal, la optimización lineal entera mixta, la optimización no lineal, la optimización estocástica y la optimización dinámica. Por otro lado, la optimización metaheurística implica procesos inspirados en la naturaleza, comportamiento social y otros fenómenos. Esta categoría abarca algoritmos evolutivos (como el algoritmo genético), búsqueda tabú, recocido simulado, sistemas multiagente y colonia de hormigas (Tooryan et al., 2013; Bahrami and Imari, 2014; Lara et al., 2018; Grisales et al., 2018).

En las próximas subsecciones se presentan las características principales de los modelos de optimización y se profundiza en el método metaheurístico recocido simulado, así como en el algoritmo Louvain.

2.4.1. Modelos de optimización

Los modelos de optimización pueden ser descriptos de forma genérica con los siguientes tres elementos (Ramos et al., 2010):

1) Función objetivo: La función objetivo en un problema de optimización es una expresión matemática que representa el objetivo principal del problema. Esta función define la relación entre las variables de decisión y la métrica que se busca maximizar o minimizar. Dependiendo de la naturaleza del problema, esta función puede depender de una o más variables de decisión y puede ser lineal, no lineal, convexa o cóncava. En ciertos casos es necesario utilizar más de una función objetivo.

2) Variables de decisión: Las variables de decisión en un problema de optimización son aquellas que el modelo puede ajustar o modificar para encontrar la mejor solución

posible. Estas variables representan las decisiones que se deben tomar para alcanzar un objetivo específico. Pueden ser valores numéricos o booleanos que representan las opciones disponibles para el sistema en estudio.

3) Restricciones: Las restricciones son el conjunto de relaciones que enmarca la situación a modelar: pueden establecer limitaciones del sistema, limitaciones tecnológicas, leyes naturales que se deben satisfacer o restricciones intrínsecas que caracterizan al modelo. Se pueden establecer dos tipos de restricciones: restricciones de igualdad y restricciones de desigualdad, y se expresan típicamente como ecuaciones o desigualdades que relacionan las variables del modelo.

Con estas definiciones, puede establecerse que un problema de optimización consiste en buscar los valores de las *variables de decisión* de modo que, cumpliendo con el conjunto de ecuaciones e inecuaciones que representan las *restricciones* del sistema, proporcione el mejor valor posible para la *función objetivo* que se utiliza para medir el aprovechamiento del sistema que se estudia.

La mayoría de los problemas de optimización pueden ser escritos de forma genérica del siguiente modo (Yang, 2010):

$$\min_{\mathbf{x}} \quad f_i(\mathbf{x}), \quad (i = 1, 2, \dots, M), \quad (2.10)$$

$$\text{suje } a : \quad \phi_j(\mathbf{x}) = 0, \quad (j = 1, 2, \dots, J), \quad (2.11)$$

$$\psi_k(\mathbf{x}) \leq 0, \quad (k = 1, 2, \dots, K), \quad (2.12)$$

donde $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ es el vector de diseño n-dimensional que contiene las x_n *variables de decisión*, $f_i(\mathbf{x})$ representa las *funciones objetivo*, y $\phi_j(\mathbf{x})$ y $\psi_k(\mathbf{x})$ son las *restricciones* de igualdad y desigualdad, respectivamente. Para formular optimizaciones en las que se busca maximizar la función objetivo, el problema puede ser planteado como la minimización de la función $-f_i(\mathbf{x})$. Así, sin pérdida de generalidad, la optimización puede entenderse como minimización, ya que el máximo de una función se puede encontrar buscando el mínimo del opuesto de la misma función. Del mismo modo, se

puede aplicar para formular restricciones de mayor o igual $\psi_j(\mathbf{x}) \geq 0$, reescribiendo su equivalencia $-\psi_j(\mathbf{x}) \leq 0$. El número n de variables, así como la cantidad M de funciones objetivos y el número J y K de restricciones no necesitan estar relacionados de manera alguna.

2.4.2. Optimización Multiobjetivo

Los problemas de decisión en la vida real usualmente requieren la búsqueda de soluciones que satisfagan múltiples criterios simultáneamente. Cuando es factible combinar los objetivos de un problema de manera adecuada, es posible considerar un único objetivo a optimizar. Sin embargo, lo usual es que no se conozca la manera de combinar los diferentes objetivos o que estos sean contradictorios, resultando imposible unificarlos en una única función (Zitzler et al., 2000). En ciertos casos, puede suceder que una solución obtenida al optimizar un objetivo resulte no óptima bajo el enfoque de otro objetivo. Por ejemplo, una persona quiere comprar un auto. Para optimizar su compra, su decisión va a depender del precio del auto, del consumo de combustible y de la potencia. Por lo tanto, la persona puede buscar el auto más barato, con mayor potencia y con el menor consumo combustible. Sin embargo, el problema de encontrar el *mejor* surge al notar que el más potente es, al mismo tiempo, el que más combustible consume, anulando la posibilidad de conseguir un auto que satisfaga sus objetivos de manera simultánea.

Cuando se estudia un problema con objetivo único, la evaluación de la función objetivo devuelve un escalar, lo que facilita la comparación entre soluciones al ser posible definir un conjunto totalmente ordenado con las soluciones. Por otro lado, en la optimización multiobjetivo, la evaluación de las M funciones objetivos devuelve un vector solución, por lo que también se puede denominar como optimización vectorial. Así, mientras que en la optimización con objetivo único se busca un vector de decisión de n dimensiones que optimice una función escalar, en la optimización multiobjetivo se busca encontrar un vector de decisión de n dimensiones que optimice un conjunto de M funciones, donde cada función $f_i(x)$ representa un objetivo diferente. Es decir, en lugar de buscar una solución que maximice o minimice una sola medida, como en la optimización con objetivo único, en la multiobjetivo se busca un conjunto de soluciones que sean óptimas

en términos de múltiples objetivos, lo que puede generar un conjunto de soluciones en lugar de una sola solución óptima.

2.4.3. Conjunto óptimo de Pareto

En optimización de problemas con múltiples objetivos contrapuestos se busca un conjunto de soluciones que tengan un compromiso entre los criterios considerados. El frente de Pareto es un método ampliamente utilizado para comparar soluciones en problemas multiobjetivos, y su concepto de optimalidad lleva el nombre de Vilfredo Pareto, el economista italo-francés que desarrolló una forma de evaluar la calidad de las soluciones en este tipo de problemas.

Para entender la dominancia de Pareto en un problema con un conjunto de M objetivos y n variables de decisión, al considerar dos soluciones, $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ y $\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_n)$, cuyos valores de las funciones objetivo son $f_i(\mathbf{u}) = [f_1(u), f_2(u), \dots, f_M(u)]$ y $f_i(\mathbf{v}) = [f_1(v), f_2(v), \dots, f_M(v)]$. Se dice que \mathbf{u} domina a \mathbf{v} si es mejor o igual en todos los M objetivos y estrictamente mejor en al menos uno de ellos ([Von Lücken et al., 2004](#)). En el caso en que todas las funciones objetivo son de minimización, la dominancia de \mathbf{u} sobre \mathbf{v} se expresa de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} f_1(u) &\leq f_1(v), \\ f_2(u) &\leq f_2(v), \\ &\dots \\ f_j(u) &< f_j(v) \\ &\dots \\ f_M(u) &\leq f_M(v), \end{aligned}$$

donde al menos en uno de los componentes homólogos de los vectores $f_i(\mathbf{u})$ y $f_i(\mathbf{v})$ se satisface $f_j(u) < f_j(v)$. Si no existe dominancia entre los vectores, son indiferentes entre sí, y ninguno puede considerarse mejor que el otro con respecto al conjunto de criterios del problema.

Después de aplicar de manera iterativa estas reglas ($f_j(u) < f_j(v)$) a un conjunto de soluciones en un problema de optimización multiobjetivo, se pueden identificar las alternativas dominantes, formando lo que se conoce como el *conjunto no dominado*. Las soluciones restantes constituyen el *conjunto dominado*. Si el conjunto de soluciones no dominadas se obtiene después de realizar suficientes iteraciones para explorar todo el espacio de soluciones, entonces a estas soluciones se les denomina *Pareto óptimas* (Meneses and Echeverri, 2007). Sin embargo, en problemas de tipo NP-completo, que se desarrollarán en las siguientes subsecciones, se utilizan métodos heurísticos que no exploran exhaustivamente todo el espacio de búsqueda de soluciones. En estos casos, las soluciones que se consideran las mejores después de la optimización se denominan comúnmente *Pareto óptimas*, aunque técnicamente no sea un término preciso.

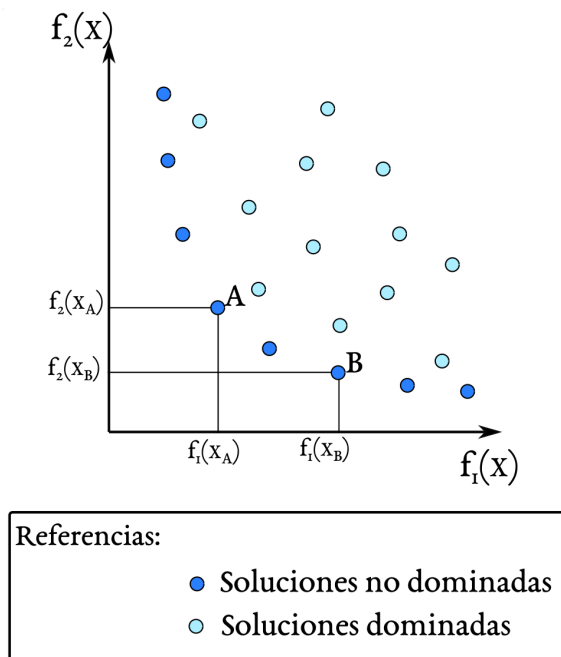


FIGURA 2.2: Dominancia de soluciones y frente Pareto

La Figura 2.2 ilustra la dominancia de soluciones y el frente de Pareto en un problema con dos criterios de minimización, f_1 y f_2 . Las soluciones representadas por círculos azules no son dominadas por ninguna otra solución, ya que no hay soluciones que puedan mejorar el valor de una función objetivo sin empeorar el valor de la otra. Este concepto se ejemplifica con las soluciones no dominadas x_A y x_B . Aunque $f_1(x_A) < f_1(x_B)$, x_A

no domina a x_B porque $f_2(x_A) > f_2(x_B)$, manteniendo así un compromiso entre los diferentes objetivos (Von Lücken et al., 2004).

Por otro lado, las soluciones representadas por círculos celestes son dominadas por alguna otra solución que mejora al menos el valor de una de las funciones objetivo sin empeorar el valor de la función objetivo restante.

La solución resultante de una optimización multiobjetivo se compone de un conjunto de soluciones que son Pareto óptimas. Debido a la forma característica en que estas soluciones están dispuestas en el espacio objetivo (ver Figura 2.2) se las denomina *Frente Pareto* (Van Veldhuizen, 1999). La forma del frente puede variar, exhibiendo configuraciones lineales, cóncavas, convexas, continuas, discontinuas, entre otras, dependiendo de las propiedades de las funciones objetivo que caracterizan el problema.

2.5. Métodos heurísticos y metaheurísticos

En contraposición con los métodos matemáticos que proporcionan soluciones óptimas, de los métodos heurísticos se esperan soluciones sobre las que se tiene cierta confianza de que alcanzan un alto grado de optimalidad. Los métodos heurísticos son procedimientos diseñados especialmente para abordar problemas específicos, empleando toda la información disponible y el análisis teórico del modelo en cuestión. En la resolución de problemas particulares, han surgido procedimientos heurísticos exitosos. A partir de estos, se ha intentado extraer los elementos esenciales de su éxito con el objetivo de aplicarlos a otros problemas o en contextos más amplios.

Dentro del campo de la inteligencia artificial, especialmente en relación con los sistemas expertos, se ha realizado una notable contribución al desarrollo científico de las heurísticas y a la ampliación de su aplicación. Se han obtenido técnicas y recursos específicos como estrategias de diseño generales para procedimientos heurísticos de resolución de problemas. Estas estrategias han contribuido en la construcción de algoritmos que quedan por encima de la heurística y van más allá. En el año 1986 el investigador Fred Glover publicó su artículo “Future paths for integer programming and links to artificial intelligence” (Glover, 1986) donde introdujo el concepto de búsqueda Tabú. En este

artículo, Glover expresó “La búsqueda tabú puede verse como una “meta-heurística” superpuesta a otra heurística”. A partir de entonces, han surgido numerosas propuestas para diseñar procedimientos efectivos en la resolución de diversos problemas, los cuales, al expandir su campo de aplicación, se han denominado metaheurísticas. Aunque no existe un criterio claro y unificado sobre la definición de algoritmo metaheurístico (Blum and Roli, 2003), se trata de estrategias de carácter genérico que conducen a la búsqueda de soluciones.

Los métodos de optimización metaheurísticos también pueden considerarse métodos de optimización inspirados en metáforas, ya que la mayoría de los algoritmos se basan en observaciones de fenómenos naturales y modelan procesos naturales para resolver problemas. Esto se fundamenta en que la naturaleza ha evolucionado durante millones de años y ha obtenido soluciones óptimas a casi todos los problemas que encontró (Rao, 2019).

La flexibilidad de los métodos metaheurísticos permite su aplicación a una amplia variedad de problemas, pudiendo adaptarse para aprovechar diversas capacidades computacionales disponibles. No obstante, para aprovechar eficazmente esta flexibilidad, se hace imprescindible contar con un conocimiento profundo del método metaheurístico empleado. Esto se debe a que cada problemática concreta demanda la adecuación de una serie de parámetros particulares para lograr una implementación exitosa.

Al igual que con los métodos heurísticos, no se puede afirmar que un método metaheurístico encontrará la mejor solución para un problema. Al tratarse de métodos que no pretenden explorar la totalidad del espacio de búsqueda sino que usan recursos para explorar inteligentemente ciertos caminos del espacio de búsqueda no puede garantizarse su optimalidad o su factibilidad, así como tampoco puede establecerse qué tan cercana es la solución obtenida a la mejor solución. Una de las características más notables de estos métodos es su capacidad para proporcionar soluciones de alta calidad en un tiempo de cómputo razonable. Esto incrementa significativamente la eficiencia en la búsqueda de soluciones, lo que es especialmente valioso en situaciones donde explorar todo el espacio de búsqueda sería computacionalmente prohibitivo.

2.5.1. Elección del método adecuado

En el ámbito de la optimización, los problemas pueden variar en complejidad. Por ejemplo, existen problemas lineales que tienen una resolución relativamente simple, donde tanto la función objetivo como las restricciones (ecuación 2.10) se expresan de manera lineal. En estas situaciones, si las variables de diseño son continuas, se pueden aplicar métodos de optimización convencionales como el método simplex. La disponibilidad de herramientas informáticas modernas facilita enormemente la obtención rápida de soluciones óptimas en muchos de estos casos. Sin embargo, también existen numerosos problemas de optimización en ingeniería que resultan ser *difíciles de resolver*. Muchos de estos problemas son de naturaleza combinatoria, lo que significa que el espacio de búsqueda de soluciones es demasiado amplio para ser abordado eficientemente con métodos de optimización matemática. Ante la necesidad de resolver eficientemente una gran cantidad y variedad de problemas difíciles, han surgido los procedimientos metaheurísticos. Estos procedimientos permiten encontrar soluciones de calidad de manera eficiente, donde la velocidad para obtener resultados confiables es tan importante como la calidad de la solución obtenida (Martí, 2003). Para describir la complejidad de los problemas *difíciles de resolver* que son abordados por los métodos heurísticos, se utiliza el término NP-difícil (NP-hard en inglés). En la teoría de la complejidad computacional, NP es el acrónimo en inglés de *nondeterministic polynomial time* (tiempo polinomial no determinista) y se refiere a la clasificación de este tipo de problemas de decisión. Los problemas de optimización que se abordarán en la presente tesis son de naturaleza combinatoria, del tipo NP-difícil. A continuación, se describirán los métodos heurísticos y metaheurísticos que se utilizarán para el desarrollo de la metodología propuesta en esta tesis.

2.5.2. Algoritmo Louvain

En la última década, un creciente número de trabajos han mostrado una amplia gama de métodos para la sectorización de las redes de agua potable (Khoa Bui et al., 2020). Se han propuesto diferentes enfoques, por ejemplo, basados en una aglomeración codiciosa (Clauset et al., 2004; Newman, 2004), división espectral (White and Smyth, 2005) y

recocido simulado (Reichardt and Bornholdt, 2006). En este trabajo, se propone la maximización del índice de modularidad mediante la utilización de un algoritmo heurístico inspirado en el método Louvain (Blondel et al., 2008). Como se explicó en la Sección 2.2.2, el índice de modularidad es una métrica escalar que evalúa la capacidad de una red o una estructura de red para ser dividida en comunidades.

El algoritmo Louvain fue propuesto en 2008 por un grupo de investigadores de la Universidad Católica de Lovaina (Bélgica), V.D. Blondel, J.L. Guillaume, R. Lambiotte, R. y E. Lefevre. Este método es un algoritmo voraz basado en la heurística de movimiento local y optimización de la modularidad (Waltman and van Eck, 2013), proporciona resultados muy buenos a gran velocidad, particularmente cuando se consideran redes de gran tamaño. Estas propiedades han potenciado notablemente su popularidad, convirtiéndose así en uno de los algoritmos de detección de comunidades más aplicados del momento (Sharma and Bedi, 2017).

Se trata de un proceso multi-fase, que proporciona una partición no jerárquica del conjunto de nodos. Se basa en dos conceptos esenciales: la modularidad de una partición y la variación de dicha modularidad cuando el nodo i se mueve desde la comunidad a la que pertenece (C_i) hasta C_j , la comunidad a la que pertenece el nodo j . Esta variación, se mide como $\Delta Q_i(j)$.

Este algorítmico se divide en dos fases que se van repitiendo reiteradamente.

Primera fase: Inicialmente cada nodo se define por sí mismo como una comunidad. Luego, para cada comunidad i se evalúa sus vecinos (j) y se calcula el aumento de la modularidad que ocasionaría cada agrupamiento. La ecuación que se utiliza para evaluar la ganancia de modularidad ΔQ al mover una comunidad i a una nueva comunidad C_j se define como (Blondel et al., 2008):

$$\Delta Q = \left[\frac{\sum_{in} + 2k_{i,in}}{2m} - \left(\frac{\sum_{tot} + k_i}{2m} \right)^2 \right] - \left[\frac{\sum_{in}}{2m} - \left(\frac{\sum_{tot}}{2m} \right)^2 - \left(\frac{k_i}{2m} \right)^2 \right] \quad (2.13)$$

donde \sum_{in} es la suma de los pesos de los enlaces dentro de C_j , \sum_{tot} es la suma de los pesos de los enlaces incidentes a los nodos en C_j , k_i es la suma de los pesos de los enlaces

incidentes a la comunidad i , $k_{i,in}$ es el suma de los pesos de los enlaces de i a los nodos en C_j y m es la suma de los pesos de todos los enlaces en la red.

El nodo i será asignado a la comunidad j que produzca mayor aumento del índice de modularidad ΔQ . En el caso en que ninguna configuración produzca un aumento de la modularidad, el nodo i seguirá perteneciendo a la comunidad original. Este proceso se repetirá para todos los nodos de V , tomándolos aleatoriamente. Esta aleatoriedad implica que un nodo pueda ser analizado varias veces. Para evaluar el cambio de comunidad de un nodo i se evalúa el cambio de modularidad eliminando i de su comunidad y luego moviéndolo a una comunidad vecina.

La etapa culmina cuando ningún movimiento individual pueda mejorar el valor de la modularidad.

Segunda fase: se define una nueva red, donde cada nodo se denomina *supervértice* y representa las estructuras de comunidades detectadas en la primera fase. Para esta nueva red, la ponderación de los enlaces entre dos nuevos nodos estará dada por la suma de las ponderaciones de los enlaces entre los nodos de las dos comunidades correspondientes (Arenas et al., 2007).

Tras la construcción de la nueva red, el siguiente paso de la Fase 2 no es más que la aplicación de la Fase 1, considerando esta nueva red como parámetro de entrada.

Una vez obtenida la red ponderada de la segunda fase, se vuelven a repetir las fases de redistribución de las comunidades y la transformación a la red de nodos de comunidades ponderados iterativamente. Luego de cada iteración el número de nodos para formar las comunidades es menor, consecuentemente la mayor parte del tiempo de cálculo se utiliza en los primeros pasos. El proceso se termina cuando no hay más cambios que posibiliten mejorar el valor de modularidad obtenido.

Este sencillo algoritmo tiene varias ventajas, como ser fácil de implementar y poseer pasos intuitivos. Pero su principal ventaja es su rapidez, esto se debe al hecho de que las posibles ganancias en modularidad son fáciles de calcular con la ecuación 2.13 y que el número de comunidades disminuye drásticamente después de las primeras iteraciones.

2.5.3. Recocido Simulado

Los pioneros en la aplicación del recocido simulado a problemas de optimización fueron Kirkpatrick, Gelatt y Vecchi en 1983 (Martí, 2003). Recocido simulado también es conocido como templado simulado o por su denominación en inglés, simulated annealing. Este método de optimización ofrece soluciones de alta calidad en un tiempo razonable. Al ser un algoritmo estocástico, explora el espacio de búsqueda seleccionando puntos al azar y evaluando iterativamente la función objetivo en dichos puntos (López, 2013). Una de las características más destacadas de recocido simulado, en contraste con otros métodos, es su capacidad para evitar quedar atrapado en óptimos locales. Este algoritmo de búsqueda utiliza una cadena de Markov que converge en condiciones apropiadas en términos de su probabilidad de transición (Yang, 2010). En efecto, estudios demuestran (Schneider and Kirkpatrick, 2006) que recocido simulado convergerá al óptimo global si es diseñado y ajustado adecuadamente. Aunque recocido simulado puede tener un costo computacional ligeramente mayor en comparación con otros métodos, la elección de este algoritmo se fundamenta en sus propiedades de convergencia y en su sólida base teórica (Kirkpatrick et al., 1983).

Recocido simulado se inspira en la simulación del recocido térmico de sólidos críticamente calentados. Cuando un metal es calentado a alta temperatura hasta su punto de fusión, los átomos son capaces de moverse libremente entre sí. A medida que la temperatura desciende, los movimientos de los átomos se restringen y tienden a ordenarse, formando cristales con la mínima energía interna posible. El proceso de formación de cristales depende esencialmente de la velocidad de enfriamiento. Cuando la temperatura del metal fundido se reduce muy rápido, es posible que no pueda alcanzar el estado cristalino; en cambio, si el enfriamiento es muy lento, el metal puede alcanzar un estado policristalino que tenga un estado de energía más alto en comparación con el estado cristalino. Por lo tanto, la temperatura del metal fundido debe reducirse a un ritmo lento y controlado para garantizar una solidificación adecuada con un estado cristalino altamente ordenado que corresponda al estado de energía más bajo. Este proceso de enfriamiento a un ritmo lento se conoce como recocido (Yang, 2010).

La probabilidad de que una partícula modifique su estado de energía viene dada por la siguiente expresión:

$$\Pi(\Delta E, T) = e^{\frac{-\Delta E}{K_B T}} \quad (2.14)$$

donde K_B es la constante de Boltzmann, T es la temperatura y ΔE denota el cambio de energía provocado por un cambio en las condiciones del sistema. Si esta energía decrece, el sistema se mueve al nuevo estado. Si la energía aumenta, el estado puede ser alcanzado de acuerdo a la probabilidad Π expuesta en la ecuación 2.14.

2.5.3.1. Procedimiento del algoritmo

El pseudocódigo del algoritmo de recocido simulado se muestra en la Figura 2.3. La base del algoritmo de recocido simulado es utilizar una búsqueda aleatoria en términos de una cadena de Markov, que no solo acepta cambios que mejoran la función objetivo, sino que también mantiene algunos cambios que la empeoran. En un problema de minimización, por ejemplo, se aceptará cualquier movimiento o cambio que mejore el valor de la función objetivo; sin embargo, también se aceptarán algunos cambios que incrementen los costos según la probabilidad de Boltzmann (ecuación 2.14). Esta probabilidad Π_i , también conocida como probabilidad de transición, se define para recocido simulado según siguiente ecuación:

$$\Pi_i(\Delta f_i, T_i) = e^{\frac{-\Delta Cost}{T_i}} \quad (2.15)$$

donde $-\Delta Cost$ es la variación de la función de objetivo (o función de costo) al modificarse la solución y T_i es la temperatura de recocido simulado para la iteración i .

El núcleo del algoritmo es el procedimiento Metrópolis que simula el proceso de recocido a una temperatura dada T (Figura 2.4). Las entradas del procedimiento Metrópolis son: la temperatura actual T , M que es la cantidad de iteraciones durante el cual se debe aplicar el recocido a una temperatura fija, la solución actual $CurS$, su costo $CurCost$

y la mejor solución encontrada hasta ese momento $BestS$ con su costo $BestCost$. La temperatura se inicializa a un valor T_0 al comienzo del procedimiento y se reduce de manera controlada; el parámetro α se utiliza para lograr este enfriamiento. β sirve para aumentar gradualmente el número de iteraciones empleadas a temperatura fija, a medida que la temperatura disminuye. El factor β se utiliza para realizar una búsqueda más exhaustiva al final del algoritmo cuando se están explorando soluciones cercanas al óptimo global. La variable $Iter$ registra las iteraciones que se utilizan en cada llamada al algoritmo Metrópolis. La opción utilizada en esta tesis establece que el procedimiento de recocido se detiene cuando se alcanza un número de iteraciones establecido $MaxIter$.

Algoritmo Recocido Simulado ($S_0, T_0, \alpha, \beta, M, MaxIter$)
 S_0 : Es la solución inicial
 T_0 : Es la temperatura inicial
 α : Es el factor de enfriamiento
 β : Es el factor que afecta al número de iteraciones
 M : Es la iteración hasta la próxima actualización de parámetros
 $MaxIter$: Es la cantidad total de iteraciones permitidas para el proceso de recocido

Comienzo
 $T = T_0$;
 $CurS = S_0$;
 $BestS = CurS$; ($BestS$ es la mejor solución encontrada hasta ahora)
 $CurCost = Cost(CurS)$;
 $BestCost = Cost(BestS)$;
 $Iter = 0$;

Repetir;
 Llamar a Metropolis ($CurS, CurCost, BestS, BestCost, T, M$);
 $Iter = Iter + M$;
 $T = \alpha T$;
 $M = \beta M$;

Hasta $Iter \geq MaxIter$;
Devolver $BestS$;

Fin (de Recocido Simulado).

FIGURA 2.3: Procedimiento del algoritmo recocido simulado

El procedimiento Metrópolis se muestra en la Figura 2.4. El procedimiento utiliza la función denominada *Perturba* que genera modificaciones de cualquier solución dada $CurS$ para generar una nueva solución $NewS$. La función *Costo* devuelve el costo de cada solución dada. Si el costo de la nueva solución $NewS$ es mejor que el costo de la solución actual $CurS$, la nueva solución se acepta como la solución actual y se redefine $CurS = NewS$. Si el costo de la nueva solución es mejor que la mejor solución ($BestS$) encontrada hasta el momento, también se reemplaza $BestS$ por $NewS$. Si la nueva solución tiene un costo mayor en comparación con la solución $CurS$, Metrópolis aceptará la nueva solución según la probabilidad dada por la ecuación 2.15. Para ello se genera un número aleatorio

en el rango de 0 a 1 (la generación de números aleatorios debe seguir una distribución uniforme). Si este número aleatorio es menor que $e^{-\Delta Cost/T}$, donde $\Delta Cost$ es la diferencia de costos, ($\Delta Cost = NewCost - CurCost$), y T es la temperatura actual, se acepta la solución y se define como solución actual. El procedimiento Metrópolis genera y examina M soluciones.

```

Algoritmo Metropolis (CurS, CurCost, BestS, BestCost, T, M)
Comienzo
  Repetir
    NewS = Perturba(CurS);
    NewCost = Costo(NewS);
     $\Delta Cost = NewCost - CurCost$ 
    Si  $\Delta Cost < 0$  Hacer
      CurS = NewS
      Si NewCost < BestCost Hacer
        BestS = NewS
      Fin Si
    Sino
      Si Random <  $e^{-\frac{\Delta Cost}{T}}$  Hacer
        CurS = NewS;
      Fin Si
    Fin Si
     $M = M - 1$ ;
  Hasta  $M = 0$ ;
Fin (Metrópolis).
  
```

FIGURA 2.4: Procedimiento de Metrópolis

Debe considerarse que $\Delta Cost > 0$ sólo cuando la nueva solución *NewS* es una solución desfavorable respecto a la solución corriente *CurS*, es decir, se consideran soluciones peores para salir de posibles mínimos locales. Con temperaturas elevadas, cuando $T \rightarrow \infty$, $e^{-\Delta Cost/T}$ tiende a 1, y por tanto la probabilidad anterior se aproxima a 1, lo que implica una alta probabilidad de aceptar soluciones que no mejoren el valor de la función objetivo. Por el contrario, cuando $T \rightarrow 0$, consecuentemente las probabilidades de aceptar soluciones que empeoren el valor de la función objetivo son cada vez más reducidas, dado que la probabilidad $e^{-\Delta Cost/T}$ tiende a 0. Esta estrategia permite que, al final de la optimización, el algoritmo continúe mejorando la solución encontrada hasta el momento y no acepte fácilmente soluciones de mala calidad. Esto facilita una exploración efectiva del espacio de búsqueda, y le confiere al método la capacidad de poder escapar de un óptimo local.

Una de las claves para obtener buenas soluciones implementando recocido simulado

consiste en establecer una temperatura inicial T_0 lo suficientemente alta, y un apropiado valor para el factor de enfriamiento α . La secuencia de enfriamiento deberá adaptarse de acuerdo a las características del espacio de búsqueda de soluciones del problema bajo estudio. La medida en que disminuye la temperatura y durante qué cantidad de iteraciones debe mantenerse constante son parámetros que deberán escogerse cuidadosamente para cada problema. En la mayoría de los casos se requiere un proceso de puesta a punto del método mediante prueba y error.

Existen varios criterios que se pueden adoptar para finalizar la búsqueda de soluciones. Estos incluyen, entre otros, el descenso de la temperatura T_i hasta un valor preestablecido, alcanzar un número determinado de iteraciones, cumplir un tiempo predefinido de ejecución del algoritmo, o bien, cuando transcurre un número específico de iteraciones sin que el método logre mejorar la solución encontrada.

2.6. Conclusiones

En este capítulo se han expuesto las bases para desarrollar una nueva metodología que permita una sectorización óptima de redes de distribución de agua potable. Inicialmente, se analizaron los métodos de resolución del sistema de ecuaciones que representa un sistema hidráulico, seguido de la formulación de la teoría de redes utilizada para modelar los sistemas de distribución de agua potable. Además, se introdujo la definición del índice de modularidad en sus variantes topológica y característica, junto con las métricas destinadas a caracterizar las DMAs de una red de agua. Posteriormente, se presentó la formulación matemática del problema de optimización, el cual será abordado utilizando métodos heurísticos y metaheurísticos. Se realizó un análisis detallado de las metodologías aplicadas a cada uno de los problemas de optimización: el algoritmo Louvain y el algoritmo recocido simulado. También se profundizó en conceptos fundamentales relacionados con la optimización multiobjetivo.

Capítulo 3

Metodología

En este capítulo se presenta la metodología propuesta para la segmentación óptima de una red de distribución de agua en DMAs. Se describen en términos generales las dos etapas para el diseño de las DMAs, detallando las variables de decisión vinculadas a los problemas abordados en cada una de ellas. La primera consiste en la detección de comunidades y la segunda involucra la división física del sistema de agua. La implementación de cada una de estas etapas se determinará estudiando empíricamente la aplicación de diferentes criterios a redes de distribución reales.

3.1. Metodología desarrollada

El principal desafío para las empresas encargadas de administrar redes de distribución de agua potable es proporcionar un servicio que cumpla con estándares mínimos de calidad y continuidad, maximizando el rendimiento hídrico y minimizando el consumo energético. Alcanzar un escenario ideal que equilibre de manera óptima estos objetivos es extremadamente difícil, especialmente a medida que la red aumenta en tamaño o cuando no se conocen completamente las condiciones de funcionamiento de la misma. En Argentina, gran parte del servicio de provisión de agua potable es calculado proporcionalmente al terreno servido, es decir, que se desconoce el consumo real neto de los hogares o industrias. Por tal motivo, las empresas están apostando a la segmentación

de sus redes para tener un mayor control en la gestión de las presiones y los caudales circulantes, conocer de forma fehaciente el funcionamiento hidráulico de la red, así como reducir las fugas y facilitar su localización, mejorando con ello el rendimiento hidráulico de la red (Denardi et al., 2024b,a).

La sectorización contradice los criterios convencionales en el diseño de redes de agua potable (Ochoa Alejo, 2014). Tradicionalmente los diseñadores buscan configuraciones de red densamente malladas para mejorar la fiabilidad del suministro ante posibles fallos mecánicos e hidráulicos. Sin embargo, el proceso de sectorizar la red en sectores tiene como objetivo principal la minimización de conexiones entre áreas. Esto se realiza con el propósito de reducir las transferencias de agua entre distritos, aumentando así la autonomía de cada sector y, en última instancia, facilitando la gestión integral de la red.

El objetivo de esta tesis es el desarrollo de una metodología para la segmentación óptima de redes reales y la evaluación del rendimiento de las estructuras obtenidas. Para lograr esto, se propone un enfoque en dos etapas. La primera etapa consiste en la detección de las estructuras de comunidades usando el índice de modularidad. En esta etapa se investiga la capacidad que tienen los índices de modularidad presentados en la Subsección 2.2.2, para cuantificar las estructuras de la red según diferentes propiedades sean estas de conectividad (es decir, topológicas) o hidráulicas específicas.

La segunda etapa se formula como un procedimiento de optimización de dos objetivos y consiste en la división física del sistema en subsistemas o áreas mensurables (DMAs). Es decir, en esta etapa algunas de las comunidades detectadas en la primer etapa se conectan para formar DMAs. Estas áreas se diseñan implementando las siguientes funciones objetivo: (1) minimizar el número de conexiones entre las comunidades de la primera etapa (equivalentemente, maximizar el número de válvulas a instalar), y (2) minimizar tres métricas: (a) Pérdida de resiliencia, (b) Coeficiente de Gini y (c) Desviación estándar. Por lo tanto, este procedimiento proporciona tres conjuntos de soluciones óptimas que brindan la posibilidad de una comparación no sesgada porque todas se obtienen con base en el mismo agrupamiento inicial.

3.1.1. Primera Etapa: Detección de comunidades

En este estudio se aplica uno de los métodos más estudiados para la detección de comunidades que consiste en dividir a la red mediante la maximización de la modularidad. Así, la maximización de la modularidad topológica Q_T implica obtener el mayor número de módulos que sean similares en la conectividad, mientras que la maximización de la modularidad característica Q_C implica obtener el mayor número de módulos similares entre sí con respecto a la propiedad w_k .

La maximización de Q se obtiene entre todas las posibles particiones de la red en comunidades. Cada partición proporciona un conjunto de bordes, llamados cortes conceptuales. Estos son las variables de diseño en esta primera etapa y están dadas por el vector binario $X = (x_1, x_2, \dots, x_{n_p})$, donde $x_i = 0$ en caso de que exista un corte conceptual, y $x_i = 1$ en caso contrario. A partir del conjunto de s cortes se define el vector de cortes conceptuales: $S = (x_j, \dots, x_s)$ que indica las conexiones entre las comunidades detectadas. Se debe tener en cuenta que la extracción de las comunidades se lleva a cabo sin resolver el sistema hidráulico para cada solución candidata.

Como se ilustra en la Figura 3.1, las comunidades obtenidas en esta etapa son las *bases constructivas* para las DMAs, las que serán obtenidas en la segunda etapa, al seleccionar qué cortes conceptuales serán *cortes reales*, es decir, una válvula (cerrada) y cuáles deberán permanecer conectados, es decir, como cortes conceptuales no materializables o considerados como puntos de observación. Por supuesto, una partición inicial más fina, obtenida ajustando el parámetro de resolución estructural γ , ofrecerá mayores posibilidades de conectividad al costo de aumentar el esfuerzo computacional.

3.1.2. Segunda Etapa: División Física del Sistema

Orientada a la partición del sistema de agua, la segunda etapa consiste en determinar la ubicación óptima de los dispositivos de aislamiento o, lo que es lo mismo, determinar las tuberías de contorno que deben permanecer conectadas. Es importante tener en cuenta que las tuberías de límite entre dos comunidades de vecinos se especificarán todas juntas con el mismo estado: todos los cortes reales (válvulas cerradas) o todas las tuberías

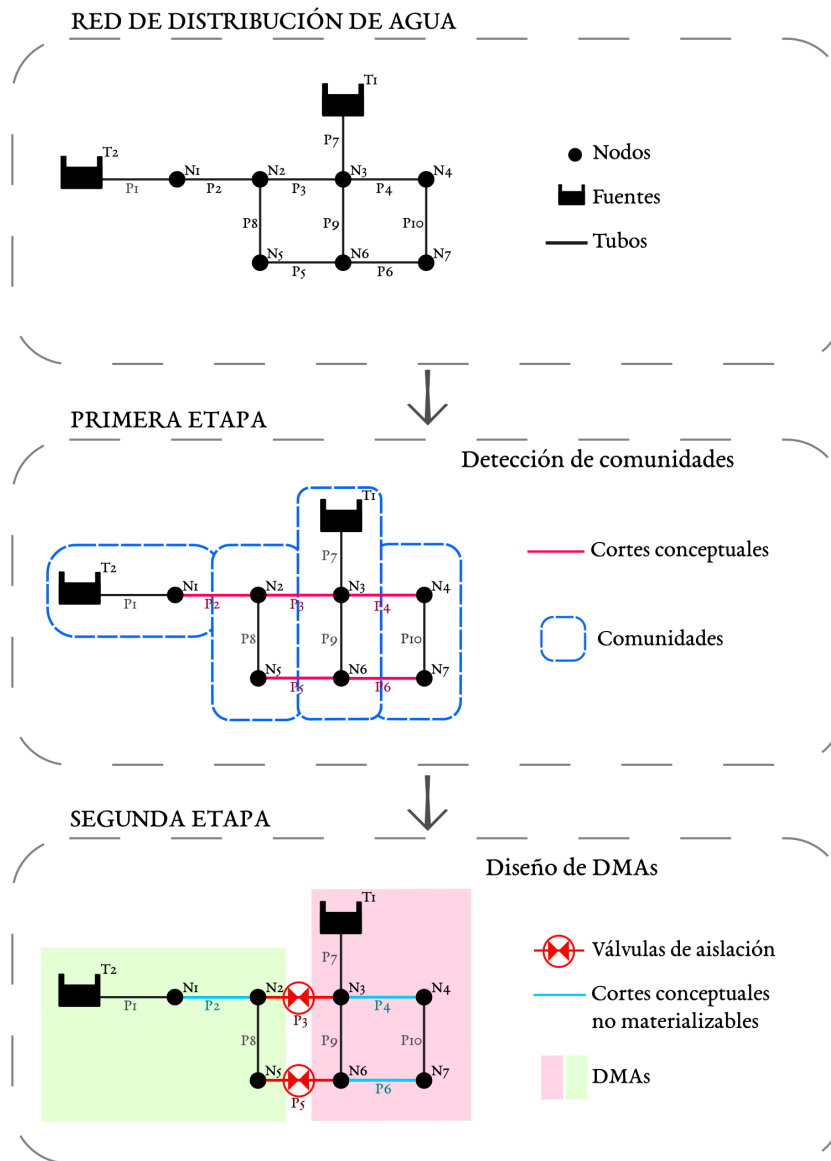


FIGURA 3.1: Proceso esquemático del diseño de áreas de medición de distrito (DMAs) para una red simple siguiendo la metodología propuesta.

conectadas. Esta condición reduce significativamente el número de variables de diseño del problema de optimización y asegura una mejora significativa en el esfuerzo computacional. Esta estrategia se logra aquí definiendo una matriz de adyacencia reducida o colapsada. Partiendo de la estructura detectada durante la primera etapa, se construye una matriz de adyacencia reducida (A_0) que codifica la conectividad entre comunidades,

similar al enfoque presentado en [Castro-Gama et al. \(2015b,c\)](#) y posteriormente aplicado a una gran red de distribución de agua en [Castro-Gama et al. \(2015a\)](#). La Figura 3.2 continúa con el ejemplo presentado y esquematiza las cuatro comunidades obtenidas y su correspondiente matriz de adyacencia reducida.

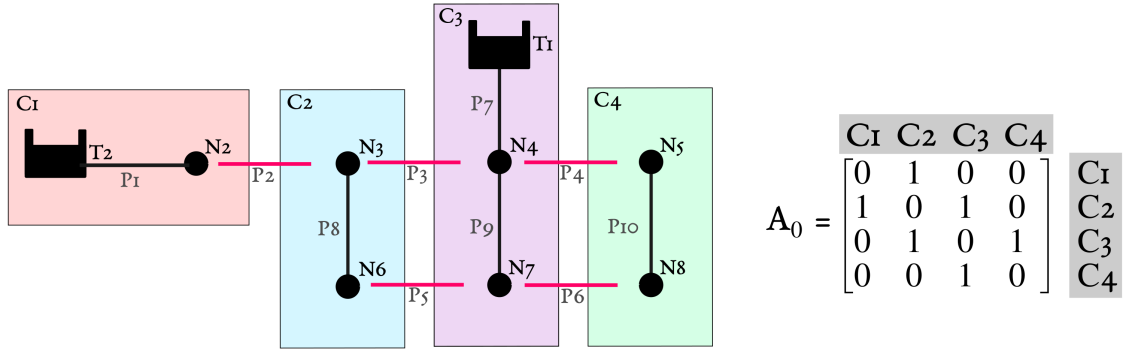


FIGURA 3.2: Esquema de comunidades obtenidas y matriz de adyacencia reducida obtenida

Como se mencionó anteriormente, la estructura topológica se puede describir como un nuevo grafo $G_0(V_0, E_0)$, donde el conjunto de vértices $V_0 = \{v_{01}, v_{02}, \dots, v_{0N}\}$ ahora representa las comunidades previamente determinadas, y el conjunto de enlaces $E_0 = \{e_{01}, e_{02}, \dots, e_{0v}\}$ representa los múltiples enlaces entre comunidades, donde N es el número de comunidades y v es el número de enlaces entre comunidades. Para el caso de la Figura 3.2, el conjunto de vértices estará dado por 4 elementos determinados por las comunidades detectadas y el conjunto de enlaces estará formado por 3 elementos $E_0 = \{e_{01}, e_{02}, e_{03}\}$, donde por ejemplo: $e_{01} = \{P_2\}$, $e_{02} = \{P_3, P_5\}$ y $e_{03} = \{P_4, P_6\}$. Para representar estos enlaces múltiples, se define un nuevo vector de diseño binario Y como $Y = (y_1, y_2, \dots, y_v)$, donde $y_i = 0$ representa un conjunto de válvulas que se instalarán en la posición i , y $y_i = 1$ representa ninguna intervención en i . Es importante destacar que un conjunto dado de enlaces (es decir, cortes conceptuales) entre dos comunidades vecinas, por ejemplo $\{x_j, \dots, x_t\}$, se encuentran asociada con una única conexión múltiple y_i , es decir: $y_i = (x_j, \dots, x_t)$ y se comprueba que $v \leq s$, siendo s el número de cortes conceptuales definidos en la primer etapa.

Esta segunda etapa de diseño se formula como un problema de optimización de dos

objetivos. Por un lado, se busca minimizar el número de cortes conceptuales que se establecerán como sin intervención (es decir, sin válvulas instaladas) en estas tuberías. Por otro lado, se busca obtener diseños de DMAs que sean fáciles de gestionar, esto es, lograr condiciones hidráulicas similares en las distintas áreas: similitud en la demanda total y uniformidad de presiones entre DMAs (Rahmani et al., 2018; Saldarriaga et al., 2019; Bianchotti et al., 2020). Para ello se estudian diferentes indicadores que caracterizan al sistema hidráulico. En esta tesis se proponen las métricas definidas en la Sección 2.3: (a) Pérdida de resiliencia (P_R), (b) Coeficiente de Gini (G), (c) Desviación estándar (S).

Formalmente, la optimización de dos objetivos se formula como:

$$F_1(Y) = \min \sum_{i=1}^v y_i \tag{3.1}$$

$$F_2(Y) = \min[P_R] \text{ o } \min[G] \text{ o } \min[S]$$

sujeto a:

$$P_i^t \leq P_i^* \quad i = 1, \dots, n$$

donde P_i^t es la presión en el nodo i , P_i^* es la presión mínima requerida en el nodo i , y t es la hora de máxima demanda.

En este capítulo se ha presentado la metodología de dos etapas propuesta, detallando las variables de decisión vinculadas a los problemas abordados en cada una de ellas. En los capítulos siguientes, se expondrán los estudios empíricos desarrollados para la implementación de esta metodología. En el Capítulo 4, se lleva a cabo el estudio de la primera etapa, centrado en la detección de las estructuras de comunidades. Posteriormente, en el Capítulo 5, se presenta el estudio correspondiente a la segunda etapa, que se centra en la sectorización para el diseño de las DMAs.

Capítulo 4

Detección de comunidades

Este capítulo tiene por objetivo seleccionar de manera empírica un índice de modularidad y un algoritmo de optimización adecuados para llevar a cabo la primer etapa de la metodología propuesta, que es la detección óptima de comunidades en redes de distribución de agua potable. Para ello se aplican las herramientas presentadas en el Capítulo 3. Se analiza la capacidad que tiene cada uno de los dos índices de modularidad descriptos (modularidad topológica y modularidad característica) para detectar las estructuras de comunidades. También se comparan los procesos de detección mediante dos algoritmos, por un lado se aplica un algoritmo metaheurístico, recocido simulado para optimización multiobjetivo; y por otro lado, el método de optimización heurístico Louvain. Además, se describen las redes que se utilizaron para validar la metodología. En un primer estudio comparativo, se analizan dos redes reales de distintos tamaños con características hidráulicas diferentes. Luego de la evaluación de los resultados, el indicador de modularidad y el algoritmo de optimización seleccionados se aplican a una red de mayor tamaño.

4.1. Redes Estudiadas

4.1.1. Red CTOWN

La red CTOWN es una red real presentada por Ostfeld (2012), (Figura 4.1) que está compuesta por 444 tubos y 396 nodos. Posee un sistema de bombeo compuesto por tres bombas instalado adyacente al reservorio principal (R_1) que bombea agua a toda la red. Existen además cuatro sistemas de bombeo en serie compuestos por dos bombas cada uno, y siete tanques que son llenados y vaciados durante el ciclo de operación.



FIGURA 4.1: Red CTOWN

También cuenta con ocho medidores de presión, siete en los tanques y uno en el reservorio principal y, de la misma manera, son distribuidos los ocho caudalímetros. Tres válvulas

reductoras de presión y una válvula de aislación controlada por un tanque están instaladas en el sistema hidráulico. Finalmente, se encuentran instalados tres manómetros para las válvulas reductoras de presión, totalizando 23 dispositivos en la red.

El sistema hidráulico CTOWN se alimenta de un gran embalse estacional R_1 ; el agua se bombea a través de la estación de bombeo S_1 a los tanques inferiores T_1 y T_2 ; a su vez el flujo a T_2 es controlado por una válvula que es operada de acuerdo con los niveles del tanque. Desde T_2 se suministra agua mediante las estaciones de bombeo S_2 y S_3 a los dos tanques superiores T_3 y T_4 , respectivamente. Las estaciones S_4 y S_5 bombean agua del tanque T_1 a los tres tanques restantes. La estación S_4 suministra agua al tanque T_5 y la estación S_5 abastece a los tanques T_6 y T_7 .

4.1.2. Red TRN

La red de tres embalses (TRN) es una red de agua real ubicada en una provincia oriental de China. Este caso de estudio fue presentado por primera vez para su investigación por [Zheng et al. \(2013\)](#).

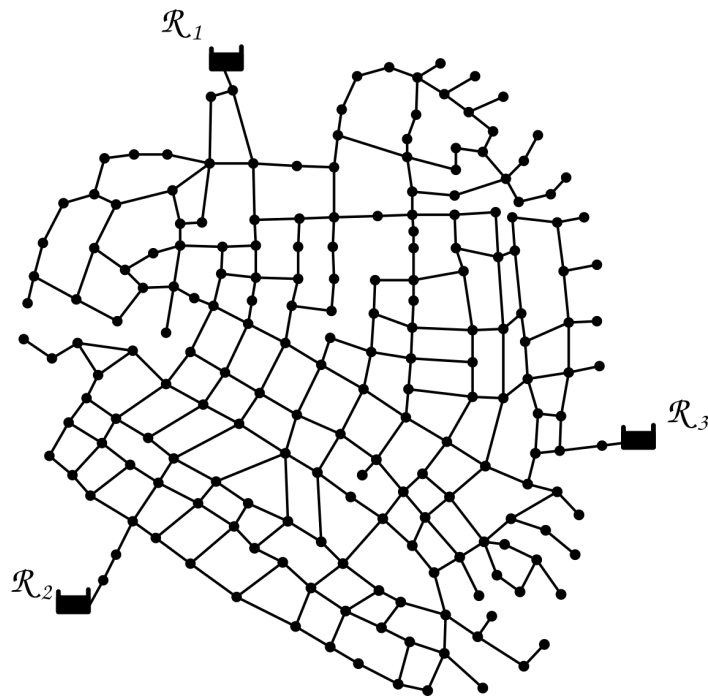


FIGURA 4.2: Red TRN

La red cuenta con tres reservorios que se indican como R_1 , R_2 y R_3 como se muestra en la Figura 4.2 y tienen alturas fijas de 44 m, 45 m, y 47 m, respectivamente. La red cuenta con 287 tuberías, 199 nodos de demanda y 86 lazos primarios. Todas las tuberías están designadas con un coeficiente de rugosidad (HW) uniforme de 130 unidades. La red no cuenta con sistema de bombeo y la diferencia geográfica entre la elevación máxima y mínima del terreno es igual a 37 m.

4.1.3. Red MLN

El siguiente caso es la red grande modificada (MLN, por sus iniciales en ingles) que fue investigada por [Kang and Lansey \(2012\)](#). La red se muestra en la Figura 4.3 y consta de 935 nodos y 1278 tuberías. El área de servicio es principalmente residencial. El sistema abarca 6,4 km (norte/sur) por 6,4 km (oeste/este). La red tiene un cambio máximo de elevación de 31 m. La topografía de la red se extiende con pendientes desde el sureste (más alto) hacia el noroeste (más bajo). La red tiene 5 embalses para abastecimiento y posee 4 patrones de demanda de 24 horas cada uno.

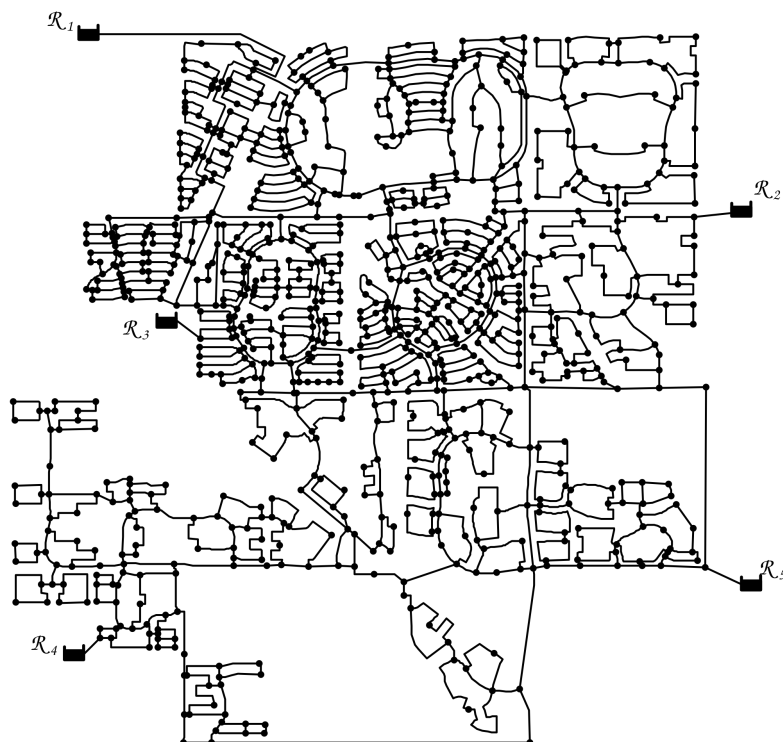


FIGURA 4.3: Red MLN

4.2. Formulación de Casos

Como se describió en el Capítulo 3, la primera etapa de la metodología propuesta tiene como objetivo proporcionar un conjunto de cortes conceptuales que definen las comunidades de la red de distribución de agua. Estas comunidades actúan como *bloques de construcción* para los distritos, ya que en la siguiente etapa se seleccionarán los cortes conceptuales que se convertirán en *cortes reales*, es decir, válvulas cerradas, y los cortes que deberán ser reconectados.

Para desarrollar una metodología aplicable a redes de diferentes tamaños y con diversas características hidráulicas, en esta tesis se han estudiado y analizado las capacidades del índice de modularidad topológico y el índice de modularidad característico. La comparación entre los dos índices de modularidad mediante la implementación del algoritmo de recocido simulado (Subsección 2.5.3) en el contexto de la red CTOWN se desarrolla en los casos **A** y **B**. Por otro lado, para el estudio de caso de la red TRN, se propone la optimización mediante el algoritmo heurístico Louvain, descrito en la Subsección 2.5.2, aplicado a ambos índices, y los resultados se presentan en los casos **C** y **D** (Figura 4.4).

		Algoritmo	
		Recocido simulado	Louvain
Modularidad	Topológica	Caso A	Caso C
	Característica	Caso B	Caso D
		Red: C-Town	Red: TRN

FIGURA 4.4: Esquema de casos de estudio

Cada solución obtenida otorga una partición, es decir, un conjunto de cortes conceptuales que son las variables de diseño de esta primera etapa (Subsección 3.1). Para todos los casos, las variables de diseño están dadas por un vector binario $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_{n_p})$, donde $x_i = 0$ en caso de que exista corte conceptual, y $x_i = 1$ en caso contrario, es decir, en el caso de que exista una conexión.

4.2.1. Caso A: modularidad topológica y recocido simulado

En este primer caso se persigue optimizar la detección de comunidades en la red de distribución de agua mediante un proceso de optimización multiobjetivo utilizando recocido simulado (Subsección 2.5.3). El primer objetivo consiste en maximizar el índice de modularidad topológica, mientras que el segundo objetivo busca minimizar el número de conexiones entre las comunidades detectadas. Formalmente, el problema de optimización se expresa:

$$\begin{aligned}
 F_1(\mathbf{X}) &= \text{máx}(Q_T) = \text{máx} \left\{ \frac{1}{2n_p} \sum_{ij} (A_{ij} - \gamma \frac{k_i k_j}{2n_p}) \delta(M_i, M_j) \right\} \\
 F_2(\mathbf{X}) &= \text{min} \left\{ \sum_{i=1}^s x_i \right\}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

4.2.2. Caso B: modularidad característica y recocido simulado

En este caso, se aborda un problema de optimización con dos objetivos. El primer objetivo es maximizar el índice de modularidad característico, mientras que el segundo objetivo consiste en minimizar el número total de tubos que separan las comunidades detectadas. Para el caso **B**, se establece la propiedad característica como la presión nodal promedio de la red antes de optimizar. Con esto se pretende que las comunidades obtenidas sean similares en términos de las presiones promedio de los nodos finales de cada uno de los tubos que componen la comunidad. El problema de optimización se formula como:

$$\begin{aligned}
 F_1(\mathbf{X}) &= \text{máx}(Q_C) = \text{máx} \left\{ \frac{1}{2W} \sum_{ij} (W_{ij} - \gamma \frac{k_i k_j}{2W}) \delta(M_i, M_j) \right\} \\
 F_2(\mathbf{X}) &= \text{min} \left\{ \sum_{i=1}^s x_i \right\}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Del mismo modo que en el caso **A**, para el proceso de optimización se emplea el algoritmo de optimización metaheurístico recocido simulado. La Figura 4.4 ilustra que en ambos casos **A** y **B** se analizó la red CTOWN. Además, en ambos casos se fijó el parámetro de resolución estructural $\gamma = 1$. Este ajuste tiene como finalidad prevenir su influencia en la detección de comunidades.

4.2.3. Caso C: modularidad topológica y algoritmo Louvain

En el tercer caso se estudia la red TRN. La detección de comunidades se realiza con el único objetivo de obtener el mejor valor de la modularidad topológica utilizando el algoritmo Louvain (Subsección 2.5.2). La función objetivo para este caso se define como:

$$F(\mathbf{X}) = \text{máx}(Q_T) = \frac{1}{2n_p} \sum_{ij} (A_{ij} - \gamma \frac{k_i k_j}{2n_p}) \delta(M_i, M_j) \quad (4.3)$$

4.2.4. Caso D: modularidad característica y algoritmo Louvain

De manera similar al caso **C**, en este caso también se realiza la optimización mediante el algoritmo Louvain. Sin embargo, la función objetivo en este caso se enfoca en el índice de modularidad característico, y queda expresada como:

$$F(\mathbf{X}) = \text{máx}(Q_C) = \frac{1}{2W} \sum_{ij} (W_{ij} - \gamma \frac{k_i^w k_j^w}{2W}) \delta(M_i, M_j) \quad (4.4)$$

Para el estudio del caso **D**, se definieron los caudales Q_{ij} de cada tubo como propiedad de ponderación en la modularidad. En ambos casos de estudio de la red TRN, se ha utilizado el parámetro de resolución estructural $\gamma = 1$.

4.3. Análisis Comparativo

4.3.1. Resultados de los casos A y B

En la Figura 4.5 se muestran los conjuntos de Pareto de las soluciones obtenidas luego del proceso de optimización. En la gráfica de la izquierda se representa el valor máximo de la modularidad topológica, y en la gráfica de la derecha, el valor máximo de la modularidad característica, ambas en función del número de cortes conceptuales.

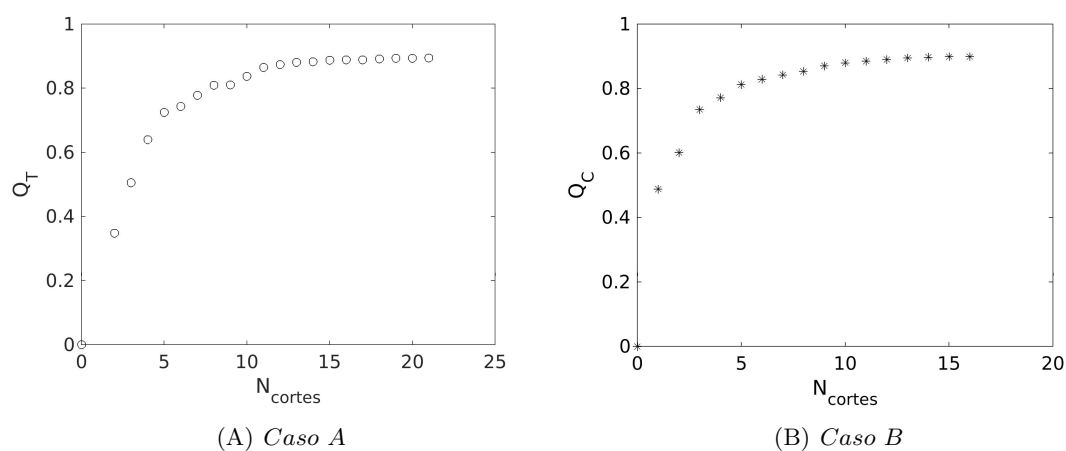


FIGURA 4.5: Conjunto Pareto de soluciones para la red CTOWN para los casos A y B

En los diagramas de Pareto se puede notar que el índice de modularidad topológica presenta 21 soluciones, mientras que la modularidad característica tiene 17 soluciones. Además, se destaca que en el caso **A** se obtuvieron soluciones con un mayor número de cortes en comparación con el caso **B**. En cada caso, se eligió una solución del conjunto de Pareto que detecta una cantidad similar de comunidades. Estas dos soluciones seleccionadas se presentan en la Figura 4.6. Las comunidades detectadas se pueden identificar sombreadas de diferentes colores, mientras que los cortes conceptuales se indican en color rojo. En la Figura 4.6(A), se muestra la solución del caso **A**, que determina 10 comunidades que están definidas por 9 cortes conceptuales. Para el caso **B**, la solución seleccionada se presenta en la Figura 4.6(B) y determina 11 comunidades delimitadas por 10 cortes conceptuales.

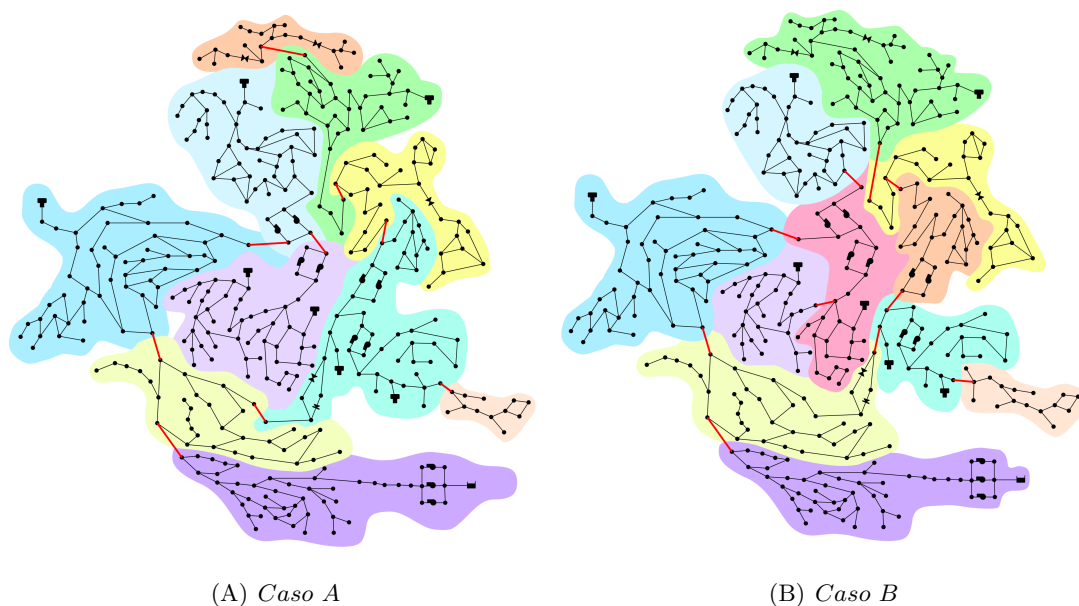


FIGURA 4.6: Comunidades detectadas para la red CTOWN

En la Figura 4.6, se observa que en los casos **A** y **B**, las comunidades detectadas son similares, aunque presentan variaciones en ciertas zonas. Por ejemplo, la comunidad en color lila (abajo) para ambos casos posee la misma configuración, mientras que la comunidad sombreada en celeste (izquierda) difiere en un nodo, y la sombreada en amarillo (derecha) en 4 nodos. Otras comunidades se forman combinando comunidades más pequeñas (por ejemplo, comunidad verde en el caso **B**). Esto indica que tanto la modularidad topológica como la modularidad característica son efectivas para identificar configuraciones similares en términos de número, disposición de comunidades y cortes conceptuales. Al comparar los resultados obtenidos en la red, se observa que la eficacia de la modularidad característica tiene limitaciones, en parte porque este índice no solo agrupa nodos con atributos similares, sino que también incorpora información sobre la topología de la red para asignar pesos a los nodos.

4.3.2. Resultados de los casos C y D

En la Figura 4.7 se muestran las comunidades detectadas para la red TRN correspondientes a los casos **C** y **D**. En la figura se indican las comunidades sombreadas con distintos colores y los cortes conceptuales en color rojo. El caso de estudio **C** (Figura

4.7(A)), ilustra 10 comunidades obtenidas y corresponde al máximo global de modularidad topológica obtenido de un resultado de la primera etapa para la red TRN. Esta solución determina 38 cortes conceptuales. En el caso **D** (Figura 4.7(B)), muestra 54 cortes conceptuales que definen 11 comunidades. Esta configuración se corresponde con el máximo global para la modularidad calculada con la matriz de adyacencia ponderada con los caudales.

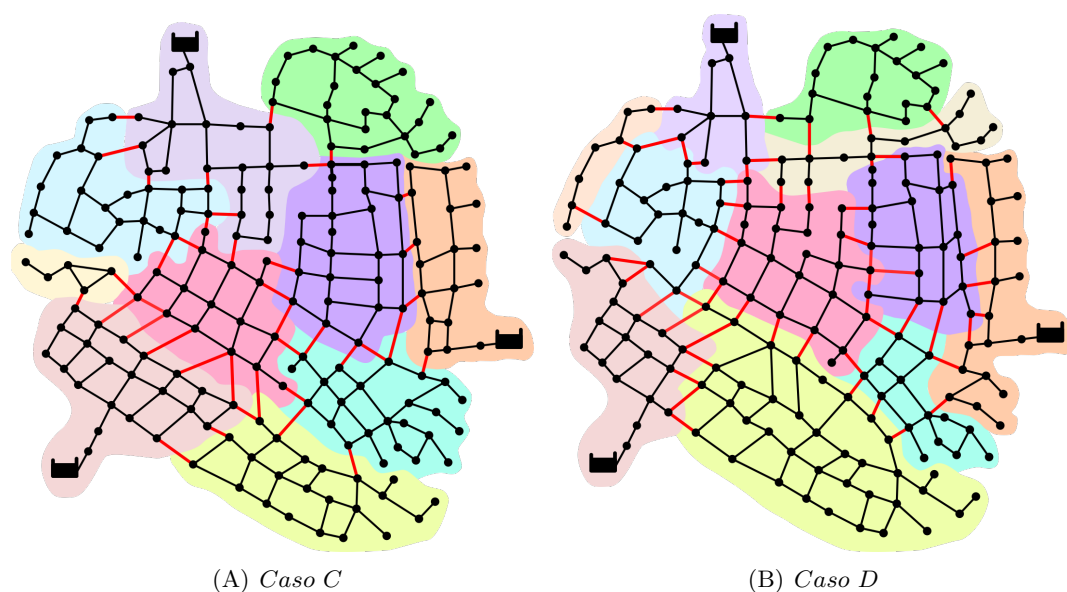


FIGURA 4.7: Comunidades detectadas para la red TRN

Al comparar los casos **C** y **D**, se observa que para un número similar de comunidades (10 y 11, respectivamente), el caso **D** aumenta en más de un 40% el número de cortes conceptuales en comparación con el caso **C**. Además, se nota que las comunidades detectadas en el caso **C** presentan tamaños más homogéneos entre sí que las obtenidas en el caso **D** al comparar la cantidad de nodos de los DMAs.

Respecto a los algoritmos de optimización, se ha observado que el algoritmo recocido simulado requiere ajustes específicos, además de la implementación de la optimización multiobjetivo, y la adaptación de perturbaciones para cada caso de estudio. En contraposición, el algoritmo Louvain ofrece una implementación más sencilla y eficiente, ya que solo requiere el ajuste del parámetro de resolución estructural. Además, es imperativo considerar los tiempos de cómputo asociados a cada algoritmo. Mientras que el algoritmo de recocido simulado aplicado a la red CTOWN demanda 82 minutos para

su ejecución, el algoritmo Louvain es capaz de resolver la optimización en una fracción de tiempo notablemente más reducida, específicamente 0,1 segundo. Asimismo, es importante destacar que, para la utilización del algoritmo Louvain, el criterio ingenieril desempeña un papel clave durante el proceso de segmentación de la red dado que la cantidad inicial de comunidades es un factor que no puede ser incorporado en ninguna sectorización automática.

Después de examinar detenidamente los resultados obtenidos, se determina que el índice de modularidad topológica es el más apropiado para la detección de comunidades en la primera etapa de la segmentación. Además, de los algoritmos implementados, el algoritmo heurístico Louvain demuestra su capacidad para proporcionar soluciones óptimas sin la necesidad de fijar parámetro alguno y en cuestión de segundos.

Con el fin de profundizar en la investigación de la metodología desarrollada, se procede a aplicarla a la red MLN. Esta red reviste una importancia significativa, ya que en la segunda etapa permitirá llevar a cabo un análisis de periodo extendido.

4.4. Aplicación de la Metodología a la red MLN

Después de establecer la metodología para la primera etapa, en esta sección se procede a analizar la red MLN. El estudio de esta red es especialmente relevante ya que es un caso de análisis de período extendido.

Para resolver esta primera etapa, se ajustó el parámetro de resolución estructural γ con el objetivo de obtener un total de 20 comunidades. Este número de comunidades se determinó teniendo en cuenta la estructura de la red y las 5 fuentes de alimentación presentes. Se busca determinar 4 comunidades por cada una de estas fuentes, permitiendo así ampliar las posibilidades de diseño en la segunda etapa.

Como resultado de la primera etapa, la Figura 4.8 muestra los 61 cortes conceptuales que delimitan las 20 comunidades detectadas. Al igual que en las figuras previas, las comunidades detectadas están sombreadas en diferentes colores y los cortes conceptuales se indican en color rojo.

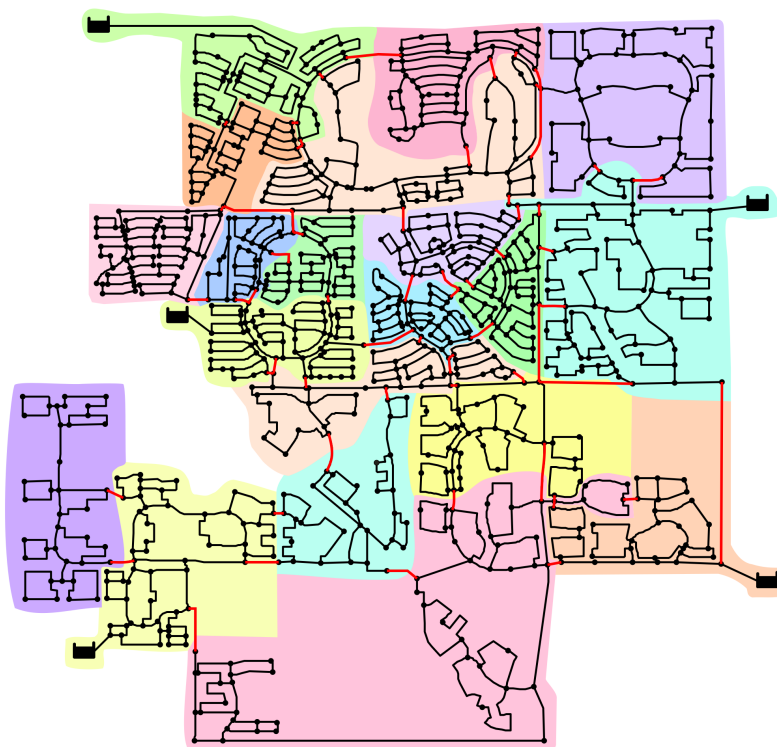


FIGURA 4.8: Comunidades para MLN

4.5. Conclusiones

En este capítulo, se estudió y comparó dos índices de modularidad con el propósito de evaluar su capacidad para identificar estructuras de comunidades en redes de agua potable. Se encontró que tanto la modularidad topológica como la modularidad característica son capaces de capturar atributos de la red bajo condiciones particulares. Sin embargo, se observó que la eficacia de la modularidad característica es limitada para la detección de propiedades en redes de gran magnitud, especialmente cuando las características elegidas para la segmentación no se distribuyen uniformemente entre todos los nodos. Además, en términos de costo computacional, la modularidad característica podría resultar más exigente, ya que implica la resolución del sistema hidráulico para extraer la propiedad seleccionada y asignar los valores necesarios a la matriz de adyacencia para el proceso de optimización. Con base en estas consideraciones se decidió que el *índice de modularidad topológica* sea la función objetivo principal para la primera etapa del proceso de diseño óptimo de la sectorización de la red.

En cuanto a la elección del algoritmo de optimización, se seleccionó el *algoritmo heurístico Louvain* debido a sus ventajas frente al algoritmo de recocido simulado. Mientras que recocido simulado requiere ajustes específicos, abordar la optimización multiobjetivo y adaptar las perturbaciones para cada caso, el algoritmo Louvain ofrece una implementación más sencilla y eficiente. Es reconocido por su rapidez en la detección de comunidades en redes complejas, además de proporcionar soluciones de alta calidad.

Finalmente, hay que destacar que el criterio ingenieril es un factor clave durante el proceso de partición de la red que no puede ser incorporado en ninguna sectorización automática. Por ejemplo, se debe definir el número de comunidades que serán los *bloques constructivos* para iniciar la segunda etapa de diseño de DMAs. Aquí se utilizaron 10 comunidades, para el primer y segundo caso de estudio y 20 comunidades para el tercero. Esto significa disponer de 3 y 4 comunidades por cada fuente de alimentación, pero las redes más complejas podrían requerir un criterio diferente.

Capítulo 5

Diseño de las DMAs

En este capítulo se presentan las herramientas desarrolladas para el diseño de las DMAs. Se continúa con el estudio de las redes TRN y MLN, los cuales fueron presentadas en el Capítulo 4. En este contexto, la red MLN se emplea para una simulación de período extendido (EPS). Como se estableció en el Capítulo 3 en esta segunda etapa se evalúan las capacidades de tres métricas diferentes (M) para determinar la ubicación óptima de los dispositivos de aislación de la red.

5.1. Estudio Comparativo de Métricas para el Diseño de DMAs

Esta segunda etapa tiene como objetivo definir la cantidad y ubicación óptima de los elementos de aislamiento, es decir, establecer cuáles de los cortes conceptuales definidos en la primera etapa podrán materializarse como válvulas de aislamiento. En los casos que se presentan en este Capítulo, las redes cuentan con múltiples fuentes, lo que motiva la búsqueda de distritos hidráulicamente autónomos. Esto permitirá cerrar todas las conexiones de cada DMA frente a tareas de refacción, realizar un estudio minucioso del sector o llevar a cabo el cierre preventivo en caso de detectar algún contaminante dentro de la red, entre otros propósitos. En las simulaciones realizadas durante la segunda fase de optimización, se examinaron los modelos de las redes de distribución de agua potable

utilizando un enfoque impulsado por presiones. Para los modelos de las redes TRN y MLN, se definió una presión mínima de $P^* = 0$ m y una presión requerida de $P^{req} = 7$ m.

Como se desarrolló en la Subsección 3.1.2, las tuberías en la frontera entre dos comunidades vecinas se especificarán todas juntas con el mismo estado: todas las válvulas cerradas (cortes reales) o todas las tuberías conectadas. Esta condición reduce significativamente el número de variables de diseño del problema de optimización y asegura una mejora significativa en el esfuerzo computacional. Para modelar los bordes múltiples, se define un nuevo vector de diseño binario \mathbf{Y} como $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_u)$, donde $y_i = 0$ representa un conjunto de válvulas que se instalarán en la posición i , y $y_i = 1$ representa ninguna intervención en i .

5.1.1. Formulación multiobjetivo de problemas

Conforme se detalla en el Subsección 3.1.2, la metodología propuesta consiste en minimizar el número de tuberías que deben permanecer conectadas, junto con la minimización de cada una de las tres métricas M : pérdida de resiliencia, coeficiente de Gini de las demandas y desviación estándar de las demandas. Cada uno de los tres procesos de optimización se realiza partiendo siempre de la misma solución (solución de la primer etapa). La formulación explícita de los problemas de optimización multiobjetivo para cada métrica se describe como sigue:

Pérdida de resiliencia

$$\begin{aligned}
 F_1(\mathbf{Y}) &= \text{mín}(P_R) = \text{mín} \left\{ 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_n} q_i^* (h_i - h_i^*)}{\sum_{F=1}^{N_F} Q_F H_F - \sum_{i=1}^{N_n} q_i^* h_i^*} \right\} \\
 F_2(\mathbf{Y}) &= \text{mín} \left\{ \sum_{i=1}^u (y_i) \right\}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Coefficiente de Gini

El coeficiente de Gini se utiliza para minimizar las diferencias absolutas de las demandas requeridas por cada comunidad:

$$\begin{aligned}
 F_1(\mathbf{Y}) &= \text{mín}(G) = \text{mín} \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |d_i - d_j|}{2n^2 \bar{d}} \right\} \\
 F_2(\mathbf{Y}) &= \text{mín} \left\{ \sum_{i=1}^u (y_i) \right\}
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

donde d_i denota la demanda total de la comunidad i , \bar{d} denota la demanda promedio de la red de agua potable completa, y n es el número de distritos.

Desviación estándar

Este índice se plantea para cuantificar la dispersión de las demandas requeridas entre los distritos:

$$\begin{aligned}
 F_1(\mathbf{Y}) &= \text{mín}(S) = \text{mín} \left\{ \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d}_i)^2}{n - 1}} \right\} \\
 F_2(\mathbf{Y}) &= \text{mín} \left\{ \sum_{i=1}^u (y_i) \right\}
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

del mismo modo que para el Coeficiente de Gini, d_i es la demanda total de la comunidad i , \bar{d}_i es la demanda promedio de la comunidad i y n es el número de distritos.

5.2. Resultados

5.2.1. Red TRN

En el capítulo anterior se describió la primera etapa de la metodología propuesta para la red TRN. Se obtuvo una solución con 38 cortes conceptuales que determina 10 comunidades (Figura 4.7(A)). Durante la segunda etapa, se obtienen múltiples diseños de DMA para cada una de las métricas M . La Figura 5.1 muestra el conjunto de Pareto de diferentes valores de M en función de la cantidad de válvulas que se instalarán para cada una de las métricas. Los resultados se muestran en las Tablas 5.1 a 5.3, donde se resumen las comparaciones entre todas las soluciones en término del número de DMAs, el número de intervenciones, el valor de cada M y otros indicadores de rendimiento del sistema hidráulico, como las presiones extremas, y los índices de los nodos donde se registran estas presiones. Cada solución presenta características hidráulicas diferentes, pero el número máximo de DMAs que se obtiene para cada M es igual al número de embalses.

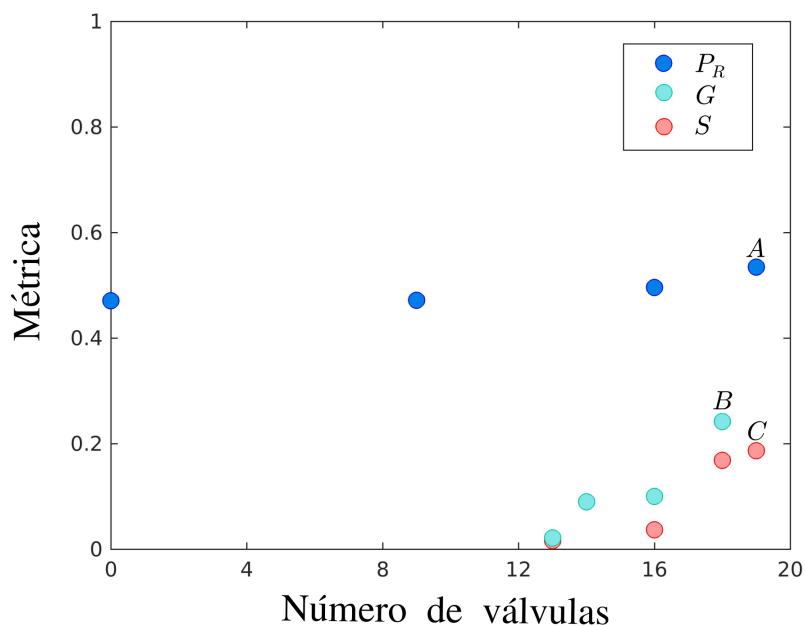


FIGURA 5.1: Conjuntos de Pareto de soluciones para la red de tres embalses (TRN) obtenidas con las tres métricas (M) estudiados. P_R : pérdida de resiliencia, G : coeficiente de Gini, S : desviación estándar.

Cabe señalar que las presiones extremas tienden a ocurrir en los mismos nodos para los diferentes objetivos. La única excepción es la primera solución que se muestra en la Tabla 5.3, donde la presión mínima ocurre en un nodo diferente. Para ilustrar una sectorización particular, las filas de color gris corresponden a aquellas soluciones que definen tres DMAs con un número similar de intervenciones. Estos distritos se muestran en la Figura 5.2 y corresponden a soluciones de los frentes de Pareto con el mayor número de intervenciones (indicadas como *A*, *B* y *C* en la Figura 5.1). La Figura 5.3 representa gráficamente las distribuciones de demanda correspondientes para cada distrito. Como se puede observar, la configuración obtenida con el coeficiente de Gini es muy similar a la obtenida a partir de la optimización de la desviación estándar. Ambas soluciones definen un distrito idéntico (sombreado en color rosa).

TABLA 5.1: Condiciones de operación para cada solución obtenida para la pérdida de Resiliencia para la red TRN.

DMAs	Nº válvulas	P_R	G	S	P_{MIN}	Índice de Nodo	P_{MAX}	Índice de Nodo
3	19	0.535	0.221	0.177	6.2	118	32.9	173
3	16	0.496	0.139	0.104	12.0	5	30.0	199
2	9	0.471	0.241	0.340	15.2	136	29.8	173
0	0	0.407	-	-	15.1	118	29.7	173

TABLA 5.2: Condiciones de operación para cada solución obtenida para el Coeficiente de Gini para la red TRN.

DMAs	Nº válvulas	P_R	G	S	P_{MIN}	Índice de Nodo	P_{MAX}	Índice de Nodo
3	18	0.555	0.242	0.182	7.6	118	32.5	199
3	16	0.499	0.100	0.075	12.0	5	28.9	199
2	14	0.496	0.090	0.128	13.5	5	28.9	173
3	13	0.548	0.022	0.016	7.4	136	28.4	173

TABLA 5.3: Condiciones de operación para cada solución obtenida para la desviación estándar para la red TRN.

DMAs	Nº válvulas	P_R	G	S	P_{MIN}	Índice de Nodo	P_{MAX}	Índice de Nodo
3	19	0.597	0.249	0.187	3.6	161	32.4	199
3	18	0.514	0.208	0.168	9.3	118	32.6	173
2	16	0.510	0.026	0.037	9.3	118	31.8	173
3	13	0.547	0.021	0.016	7.4	136	28.4	173

La Figura 5.4 muestra las presiones obtenidas para las soluciones *A*, *B* y *C*, en el caso extremo del cierre total de las válvulas para lograr el total aislamiento de todos las DMAs. La solución *A* presenta tres rangos de presiones, uno por cada distrito, y muestra la

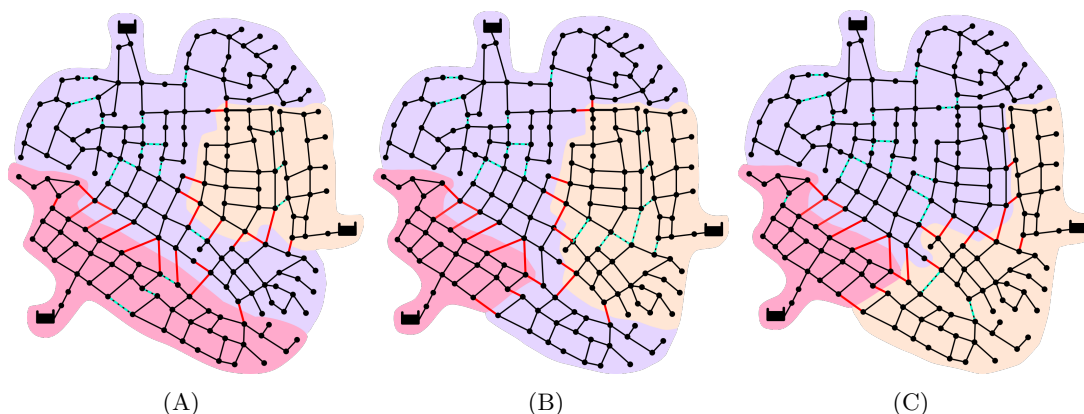


FIGURA 5.2: DMAs obtenidas después de la segunda etapa para cada M . (A) Pérdida de resiliencia, (B) Coeficiente de Gini y (C) Desviación estándar. Las soluciones corresponden a las indicadas en la Figura 5.1 y a las filas de color gris en las Tablas 5.1, 5.2 y 5.3.

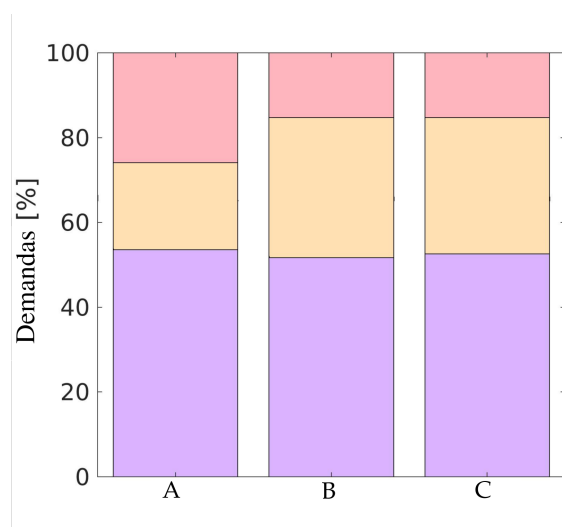


FIGURA 5.3: Distribución de demandas por DMA para cada solución A , B y C para la red TRN. Código de colores correspondiente a las DMA de la Figura 5.2

menor variación de las presiones dentro de cada distrito. El coeficiente de Gini (solución B) genera las DMAs con las presiones mínimas más altas y, además, una distribución de presiones más homogénea entre dos distritos (anaranjado y lila). La solución C muestra la mayor variación de presión en un distrito (distrito sombreado en anaranjado) entre los 5 m y 30 m de columna de agua. Esto indica que la desviación estándar no ofrece un buen desempeño para lograr un funcionamiento homogéneo del sistema hidráulico. Considerando las presiones obtenidas para estas configuraciones, se puede observar que la

minimización de la pérdida de la resiliencia provee mejor uniformidad de presiones en cada DMA autónoma cuando se la compara con las soluciones obtenidas con la desviación estándar o el coeficiente de Gini.

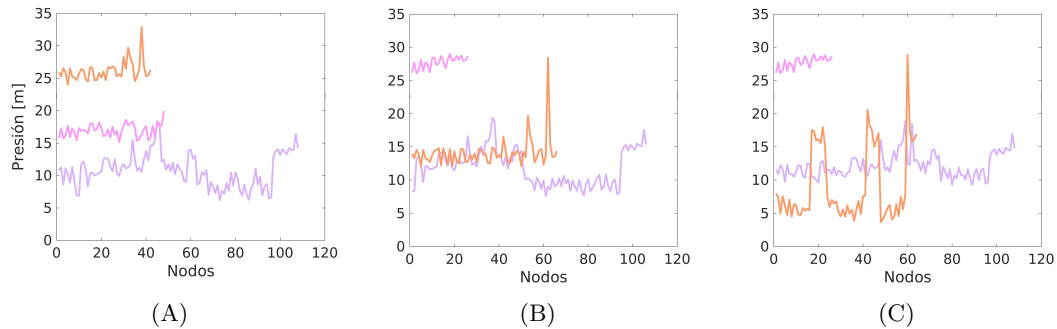


FIGURA 5.4: Presiones nodales para las soluciones *A*, *B* y *C* para red TRN. Código de colores correspondiente a las DMA de las Figuras 5.2

Comparando las soluciones *B* y *C* con la solución *A* para el distrito en color rosa de la Figura 5.3, se observa que la demanda aumenta del 15,3% al 25,9%. Este incremento genera una caída en las presiones del distrito correspondiente con un promedio de 10 m de columna de agua (Figura 5.4). Una característica similar se puede observar con la disminución de la demanda del distrito en color anaranjado.

De la Figura 5.4 también se debe notar que no existen nodos sin servicio de agua. Además, el análisis impulsado por la presión permite determinar el porcentaje de la demanda satisfecha. Para la solución *A*, solo el 3,5% de los nodos presentan valores de presión ligeramente inferiores a P_{req} , entregando el 99,9% de las demandas requeridas. Para la solución *B*, todas las presiones son superiores a la presión de servicio requerida P_{req} y, por lo tanto, se satisface el 100% de la demanda requerida. Para la solución *C*, el 13,6% de los nodos presentan presiones por debajo de P_{req} . Sin embargo, se satisface el 99,5% de las demandas requeridas.

5.2.2. Red MLN

Para la sectorización de la red MLN, el coeficiente de Gini y la desviación estándar se calculan sobre la demanda base de cada consumidor, y la pérdida de resiliencia se calcula a la hora de máximo consumo que ocurre a las veinte horas. Sin embargo, con el objetivo

de buscar soluciones con la mayor cantidad de demandas satisfechas, las presiones deben ser superiores a las presiones requeridas durante todas las horas.

Como resultado de la primera etapa (Subsección 4.4, Figura 4.8) se establecen los cortes conceptuales que descomponen la red en 20 comunidades.

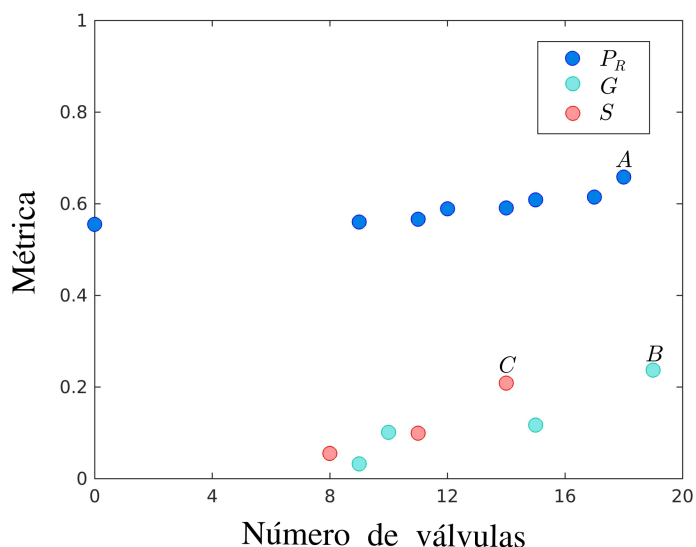


FIGURA 5.5: Conjuntos de Pareto de soluciones para red MLN obtenidas con las tres métricas estudiadas. P_R : pérdida de resiliencia, G : coeficiente de Gini, S : desviación estándar.

La Figura 5.5 muestra los conjuntos de Pareto obtenidos por la segunda etapa del procedimiento de optimización para las diferentes métricas para la red MLN. El rendimiento del sistema hidráulico evaluado para cada solución se muestra en las Tablas 5.4, 5.5 y 5.6. El coeficiente de Gini y la pérdida de resiliencia proporcionan el número máximo DMAs y un número similar de válvulas (Tablas 5.4 y 5.5). Los valores de presiones mínimas y máximas se encuentran entre 4,3 m y 28,7 m para ambos casos. En la Tabla 5.6 se observa que la solución para la desviación estándar con el número máximo de intervenciones otorga una configuración de 3 DMAs limitadas por 14 válvulas, y registra valores de presión en el intervalo 4,6 m a 29,5 m. Buscando soluciones con similar número de intervenciones, los resultados muestran diferencias en cuanto a la eficiencia de los sistemas hidráulicos. Por ejemplo, la solución obtenida al minimizar la pérdida de resiliencia que determina la instalación de 14 válvulas, establece 3 DMAs y una presión mínima de 6,0 m, superando por más de 1 m la presión registrada en las soluciones con

similar cantidad de DMAs y válvulas. Así, para ilustrar el comportamiento del sistema en un escenario particular, se analizan las soluciones con el máximo número de intervenciones obtenidas para cada métrica. Estas soluciones corresponden a las filas grises de las tablas 5.4 a 5.6 y, respectivamente, a las soluciones *A*, *B* y *C* de la figura 5.5. A primera vista, parece que esta comparación está sesgada a favor de la solución *C*, ya que tiene un número menor de distritos que las soluciones *A* y *B*. Sin embargo, cabe señalar que la comparación de *C* con las soluciones de las otras dos métricas que involucran el mismo número de distritos favorecería aún más al coeficiente de Gini y la pérdida de resiliencia.

Las configuraciones seleccionadas para cada métrica en estudio se muestran en la Figura 5.6. De manera similar a la representación de la red TRN, los colores indican diferentes DMAs.

TABLA 5.4: Condiciones de operación de cada solución obtenidas con Pérdida de resiliencia para red MLN. El fondo gris corresponde a la solución A representada en la Figura 5.5.

DMAs	Nº válvula	P_R	G	S	P_{MIN}	Índice de nodo	P_{MAX}	Índice de nodo
4	18	0.685	0.238	0.137	4.7	535	28.7	700
4	17	0.615	0.121	0.078	6.1	159	27.7	700
3	15	0.609	0.135	0.106	6.6	502	27.7	700
3	14	0.591	0.160	0.121	6.0	159	26.8	700
2	12	0.589	0.151	0.214	6.9	159	26.8	700
3	11	0.566	0.251	0.215	6.0	159	26.2	700
2	9	0.560	0.082	0.116	9.6	159	26.2	700
0	0	0.555	-	-	10.9	303	26.2	700

TABLA 5.5: Condiciones de operación de cada solución obtenidas con coeficiente de Gini para red MLN. El fondo gris corresponde a la solución B representada en la Figura 5.5.

DMAs	Nº válvula	P_R	G	S	P_{MIN}	Índice de nodo	P_{MAX}	Índice de nodo
4	19	0.666	0.237	0.128	4.3	362	28.7	700
3	15	0.650	0.117	0.088	4.3	362	28.4	700
2	10	0.580	0.101	0.143	7.3	289	26.3	700
2	9	0.644	0.032	0.046	4.9	535	28.0	700

La Figura 5.7 muestra la distribución de demandas para cada DMA. La solución obtenida con la desviación estándar muestra un mal desempeño cuando se busca homogeneizar demandas entre distritos. La Solución *C* da como resultado dos distritos más grandes con demandas de 46,1 % y 44,6 % en contraste con el 9,3 % del tercer distrito. Por otro lado, la

TABLA 5.6: Condiciones de operación de cada solución obtenidas con Desviación estándar para red MLN. El fondo gris corresponde a la solución *C* representada en la Figura 5.5.

DMAs	Nº válvula	P_R	G	S	P_{MIN}	Índice de nodo	P_{MAX}	Índice de nodo
3	14	0.708	0.245	0.208	4.6	846	29.5	700
2	11	0.658	0.070	0.099	5.2	303	29.0	932
2	8	0.589	0.039	0.055	5.1	627	26.6	700

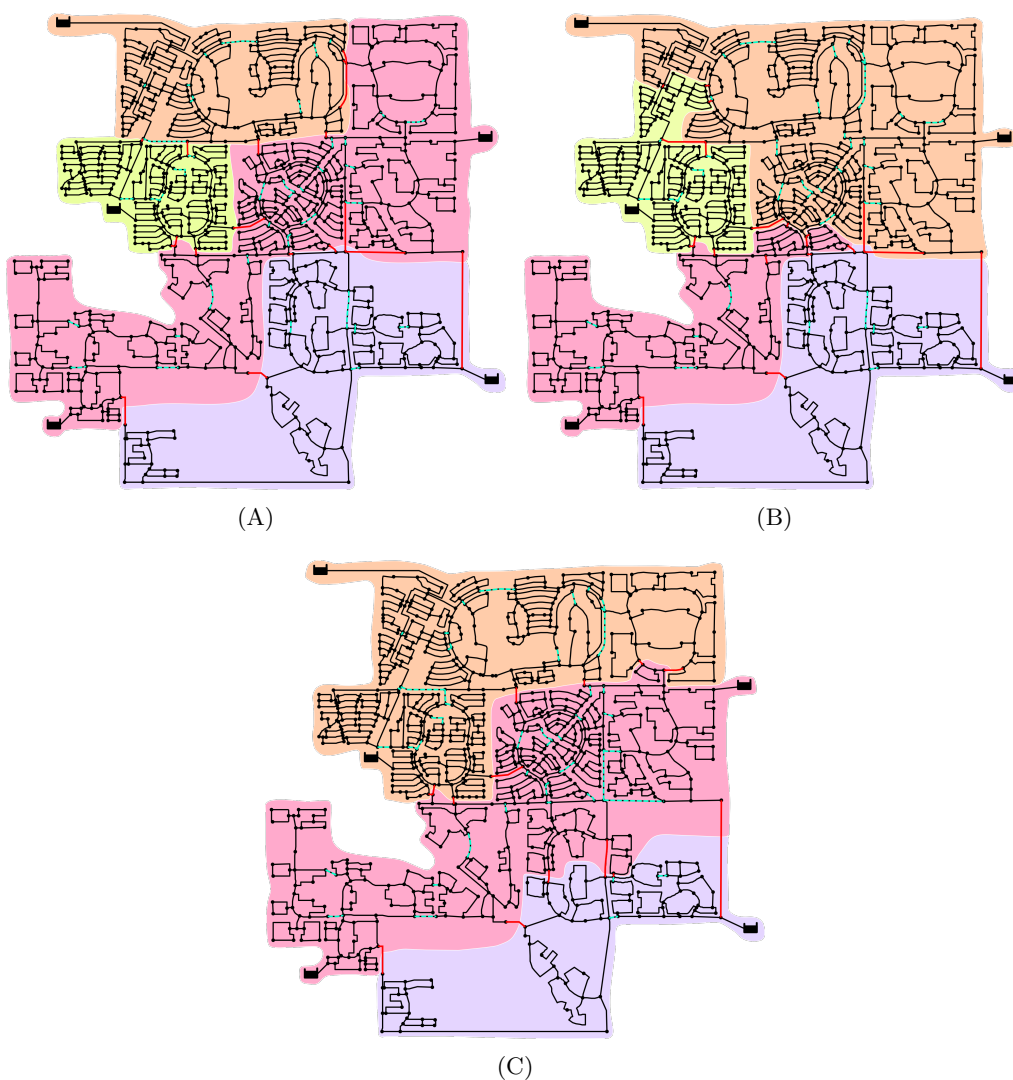


FIGURA 5.6: DMA obtenidos para la red MLN. Las soluciones A, B y C son las indicadas en la Figura 5.5 para (A) Pérdida de resiliencia, (B) Coeficiente de Gini y (C) Desviación estándar.

distribución de demandas para las soluciones A y B son más equitativas, con porcentajes iguales a 20,6 %, 44,8 %, 13,4 % y 21,2 % (para la Pérdida de resiliencia) y 42,8 % 18,7 %, 13,4 % y 24,9 % (para el Coeficiente de Gini).

13,4% y 25,2% (para el coeficiente de Gini), logrando una mejor distribución de las demandas entre los distritos.

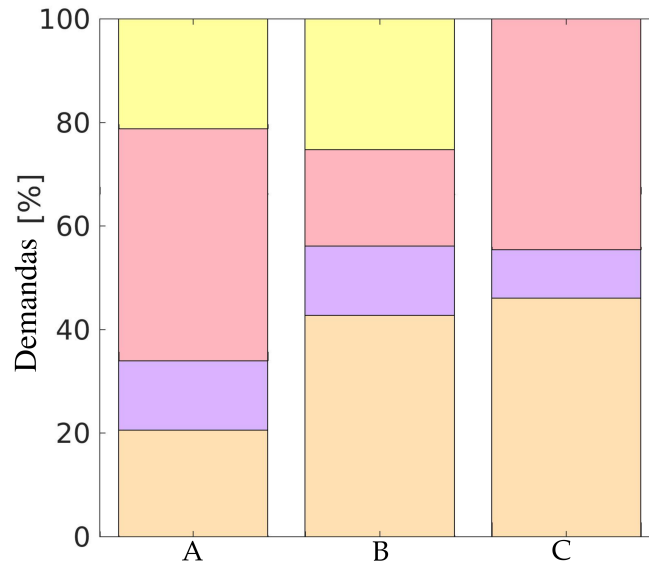


FIGURA 5.7: Distribución de la demanda por DMA para las soluciones *A*, *B* y *C* para la red MLN. Codifique los colores correspondientes a las DMA de la Figura 5.6

La Figura 5.8 muestra las presiones resultantes para el análisis impulsado por presión en el caso en el que todas las DMAs definidas operen de forma autónoma durante un período de 24 h (las soluciones *A*, *B* y *C* corresponden a la Figura 5.5). Se muestra el máximo estadístico (barra superior), el mínimo estadístico (barra inferior), los percentiles 25 y 75 (bordes superior e inferior del cuadro), la mediana (línea roja en el cuadro) y los valores atípicos (cruces rojas). La solución *A* (Figura 5.8(A)) muestra los datos de la caja con la mayor amplitud y una reducción de los valores atípicos. Además, esta solución tiene las medianas más altas de las tres mejores configuraciones. Para el caso del coeficiente de Gini (Figura 5.8(B)), las presiones entre los percentiles 25 y 75 presentan la menor dispersión de las tres soluciones. Además, la solución *B* tiene más valores atípicos por debajo del mínimo estadístico, pero los valores atípicos se reducen significativamente por encima del máximo en comparación con la solución *C*. La solución *C* (Figura 5.8(C)) presenta una asimetría para la mayoría de las horas en las cajas de presión. Muestra una gran dispersión de datos entre el percentil 25 y la mediana. Se observan valores atípicos

por encima del máximo estadístico para todas las horas del análisis. Asimismo, solo para la hora 14 un valor atípico se encuentra por debajo del mínimo.

El análisis impulsado por la presión muestra que no hay nodos sin servicio de agua. Sin embargo, la solución *C* presenta un 38 % de nodos con valores de presión ligeramente por debajo de P_{req} entregando el 97 % de las demandas requeridas. Para la solución *B*, el 24,9 % de los nodos presentan presiones por debajo de P_{req} con un 98,5 % de demandas satisfechas. Por último, para la solución *A*, el 25,9 % de los nodos muestran valores de presión ligeramente inferiores a P_{req} , entregando el 98 % de las demandas requeridas.

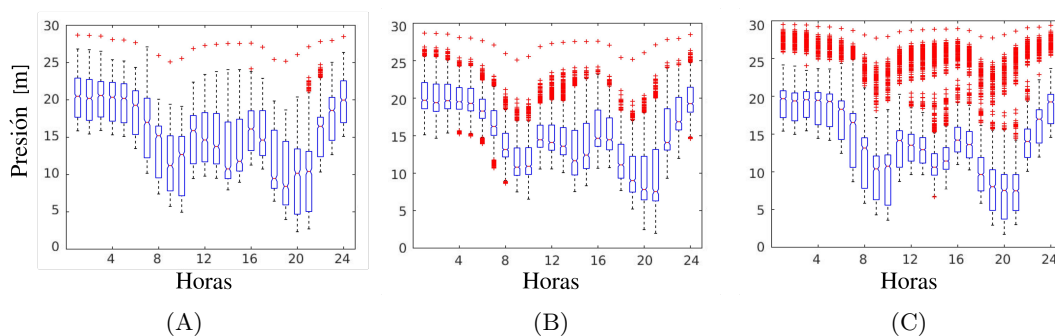


FIGURA 5.8: Variación temporal de presión para solución *A*, *B* y *C* para red MLN. Cada paso de tiempo representa un diagrama de caja para la presión de todos los nodos de la red.

5.3. Conclusiones

En este capítulo se presentan los resultados de la segunda etapa de la metodología propuesta, cuyo objetivo es alcanzar el diseño óptimo de DMAs. El propósito principal es llevar a cabo una sectorización para identificar una fuente por cada sector. En los casos que se exponen, se busca desarrollar sectorizaciones que puedan ser aisladas mediante la operación de válvulas ubicadas estratégicamente en las tuberías seleccionadas. La determinación del número y la ubicación óptima de estas válvulas se plantea como un problema de optimización multiobjetivo.

Surge el interrogante sobre cuál sería el segundo objetivo más adecuado para utilizar junto con el número de intervenciones. En este capítulo se aborda esta cuestión, y la investigación destaca las ventajas de tres métricas al aplicarlas a dos redes reales. En

particular, se investiga en qué medida dos indicadores no específicos, como el coeficiente de Gini y la desviación estándar, pueden proporcionar distritos con demandas similares. Los rendimientos de las DMAs obtenidos con estos indicadores se comparan con los obtenidos bajo la minimización de la pérdida de resiliencia.

Se observa que la aplicación de estas métricas puede tener un impacto significativamente distinto en la configuración final de las DMAs. Para los casos estudiados, se identifican dos situaciones distintas que limitan el número de DMAs en cada red. En el primer caso (TRN), el número máximo de DMAs está restringido por la cantidad de fuentes existentes. Sin embargo, en el segundo caso (MLN), el límite del número máximo de DMAs está determinado por la capacidad hidráulica de la red, es decir, no más de 4 distritos pueden cumplir con las condiciones del servicio.

Se utilizaron dos métricas, la desviación estándar y el coeficiente de Gini, con el objetivo de diseñar distritos con demandas similares. El enfoque basado en la presión para el análisis hidráulico de las soluciones indica que el coeficiente de Gini ofreció un mejor rendimiento que la desviación estándar. Es decir, al comparar el mismo número de distritos con una cantidad similar de válvulas de aislamiento, el coeficiente de Gini proporciona soluciones con la menor pérdida de resiliencia y la mayor presión mínima. Es importante destacar que la desviación estándar presenta un sesgo estadístico al analizar un número reducido de datos, lo que genera una falta de sensibilidad de la función para lograr la homogeneización de la variable. Esta podría ser la razón detrás del bajo rendimiento en comparación con las otras métricas. Es decir, no hay suficientes distritos para que esta métrica logre una buena distribución de las demandas.

Por otro lado, al comparar las soluciones proporcionadas por el coeficiente de Gini y la pérdida de resiliencia en condiciones similares, el análisis indica que la pérdida de resiliencia alcanza un mejor desempeño para cada distrito. Además, los resultados muestran que la mejor opción cuando se busca uniformidad de presión es minimizar la pérdida de resiliencia.

Capítulo 6

Aplicación a una red de AySA

Agua y Saneamientos Argentinos (AySA) es una entidad pública responsable de proveer servicios de agua potable y tratamiento de aguas residuales a una de las regiones más pobladas de Sudamérica. Actualmente, el área de cobertura incluye la ciudad de Buenos Aires y veintiséis partidos de la provincia dentro del Gran Buenos Aires. La Empresa presta servicios a una población de 11.238.106 habitantes. La extensión total de la red de agua potable abarca 25.116 km e incluye 3 plantas potabilizadoras y 27 plantas subterráneas de tratamiento de agua. La operación de esta red implica el funcionamiento de 14 estaciones elevadoras, 835 perforaciones y 88 km de ríos subterráneos, que transportan agua desde las plantas hasta las estaciones de bombeo para su suministro. En total, un promedio de 6.234.459 m³ de agua tratada ingresa a la red diariamente.

En el marco de esta investigación, en el año 2020, el Laboratorio de Métodos y Simulaciones Computacionales de la Facultad Regional Rafaela y la empresa AySA decidieron fortalecer sus vínculos y establecer un acuerdo de cooperación mutua mediante la firma un convenio de colaboración. Este acuerdo estratégico proporcionó acceso a las redes suministradas por AySA, las cuales se convirtieron en componentes esenciales para el progreso y la ejecución de los trabajos de investigación.

6.1. Red DLZ

Después de un análisis conjunto de varias redes de distribución de agua potable de la ciudad de Buenos Aires, se decidió estudiar una red específica denominada DLZ. Esta red de agua presenta problemas de eficiencia y servicio, por lo que la Empresa se ha centrado en su estudio para mejorar las condiciones hidráulicas, lo que la convierte en una elección estratégica para llevar a cabo la sectorización.

La red DLZ abarca un área de 48 km² y sirve a una población de 459.263 personas según el censo de 2010. La representación visual de esta red se muestra en la Figura 6.1. En términos de infraestructura, la red consta de 17.320 tuberías y 15.009 nodos, formando una red de suministro de agua potable compleja y diversa. La longitud total de las tuberías en este modelo se estima en 106 km.

La topografía del área se caracteriza por una diferencia de elevación de 24 metros desde el punto más alto hasta el más bajo. En términos de capacidad, el caudal de diseño de la red es de 28.680 m³/h. La operación de esta red implica la dependencia de tres fuentes de abastecimiento. De las fuentes de abastecimiento, dos de los depósitos reciben agua directamente desde la planta de potabilización. Sin embargo, la tercera fuente de abastecimiento proviene de otro partido y se transporta a través una tubería de alimentación.

Dentro de la red, el reservorio principal, identificado como R_1 en la Figura 6.1, contribuye significativamente suministrando el 92,6% del caudal total de la red. Este caudal es distribuido a través de un sistema de bombeo. Un segundo reservorio, R_2 , contribuye con el 1,4% del caudal total y dispone de una bomba que aumenta la presión en el sistema de suministro. La tercera fuente de abastecimiento, aportando el 6% del caudal total, proviene de otra red de distribución y se identifica como A_1 en la Figura 6.1. Es importante destacar que la red DLZ no solo satisface las necesidades de su área local, sino que también desempeña un papel vital al proporcionar agua a un partido vecino.



FIGURA 6.1: Red real DLZ.

6.2. Sectorización de la Red DLZ

La sectorización de la red DLZ se llevó a cabo siguiendo la metodología de dos etapas desarrollada. No obstante, a medida que se avanzó en el proceso, surgieron nuevas consideraciones que llevaron a adaptaciones en la metodología. Luego del análisis de diferentes resultados, se determinó que entre 35 y 40 DMAs generaban modelos de redes sectorizadas que resultaban útiles para la Empresa. Sin embargo, debido a la elevada inversión económica necesaria para tal sectorización y la complejidad inherente debido a la extensión de la red, se decidió sectorizar a la red de agua en macro DMAs, que en el futuro podrían ser subdivididas en 3 o 4 DMAs cada una. Como resultado, se determinó que un número adecuado de macro DMAs podría ser entre 8 y 10.

6.2.1. Detección de comunidades

Como se describió al inicio de esta sección, la sectorización de la red DLZ se diseñó para crear macro DMAs. Para ello el parámetro de resolución estructural en el algoritmo Louvain se ajustó de manera que el número de comunidades detectadas estuviera entre 8 y 10. Después de la primer etapa de optimización, la solución obtenida se muestra en la Figura 6.2. Se determinan 123 cortes conceptuales indicados en magenta, que delimitan 9 comunidades representadas en diferentes colores. Esta solución se convierte en el punto de partida para la segunda etapa, y los 123 tubos seleccionados son las variables de decisión para la instalación de las válvulas de aislación o los caudalímetros.

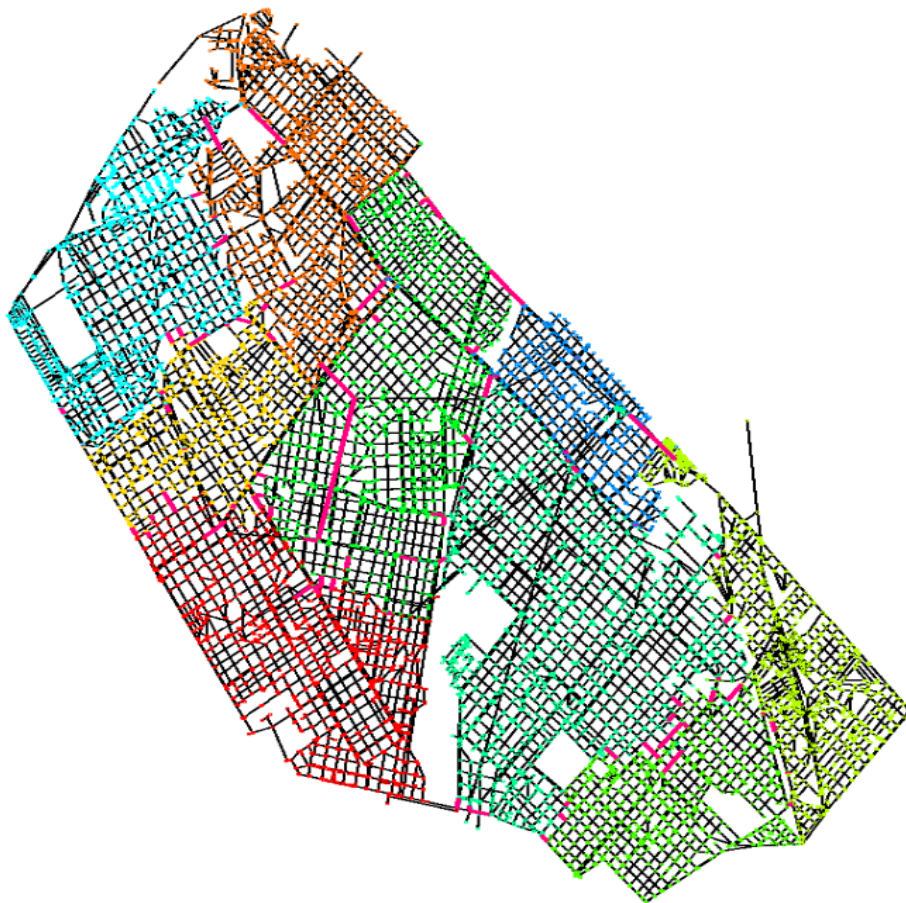


FIGURA 6.2: Comunidades detectadas para la red DLZ en la primera etapa de optimización.

6.2.2. Diseño de macro DMAs

La segunda etapa del proceso de sectorización implicó un análisis exhaustivo de la red que identificó dos factores críticos: la presión mínima registrada en la red y las disparidades en los porcentajes de suministro de las tres fuentes. Ante esta situación, se determinó que la red no era capaz de ser dividida en DMAs autónomas que permitieran mantener niveles de servicio adecuados y operar de manera uniforme en cada macro área.

Para abordar esta etapa se decidió generar un conjunto de macro DMAs interconectadas. Para ello se optó por trabajar con la matriz de adyacencia estándar (es decir, sin reducir). Así, en la segunda etapa del proceso, las variables de decisión fueron los cortes conceptuales obtenidos en la primera etapa que representan cierres potenciales de conexiones entre las comunidades detectadas. El objetivo es encontrar una solución que minimice el número de tuberías abiertas entre las macro DMAs, lo que simplificará el análisis y permitirá una descripción más eficaz del funcionamiento de la red. Dado que la presión mínima registrada en la red es de 3,1 m, se estableció una presión mínima admisible de 3 m con el objetivo de mantener los niveles de presión en toda la red sectorizada.

El conjunto de soluciones de Pareto obtenido en la segunda etapa de optimización se muestra en la Figura 6.3. La minimización de la pérdida de resiliencia generó un total de 33 configuraciones posibles. Estas soluciones proponen la instalación de entre 11 y 60 válvulas. Al examinar las soluciones obtenidas, se observó que todas las comunidades detectadas en la primera etapa permanecieron interconectadas después de la segunda etapa, a pesar de la reducción en el número de tuberías abiertas entre las áreas.

Las soluciones se analizaron estudiando las presiones en la red para cada una de las configuraciones obtenidas. La Figura 6.4 muestra las presiones resultantes de todo el sistema hidráulico para cada solución de la segunda etapa. Las soluciones se enumeran en función de la cantidad de válvulas a instalar, comenzando por la solución que implica el mayor número de válvulas (60) hasta llegar a la alternativa con el menor número (11).

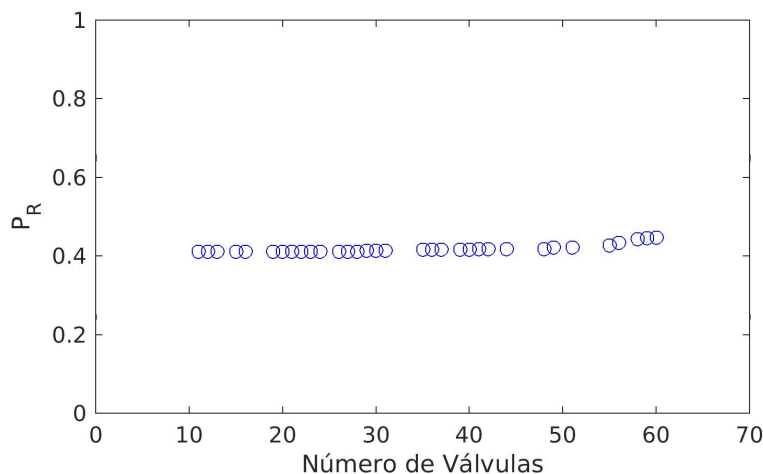


FIGURA 6.3: Frente de Pareto de soluciones obtenidas en la segunda etapa.

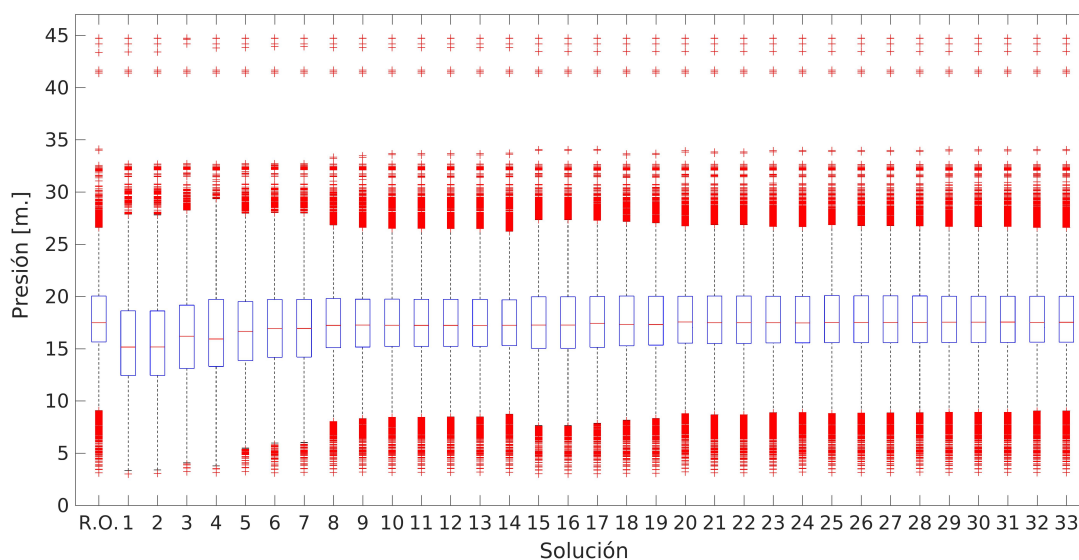


FIGURA 6.4: Variación de presión de todos los nodos para cada solución obtenida luego de la segunda etapa.

Las presiones de la red sin intervenciones se presentan en la Figura 6.4 con la etiqueta R.O. (Red Original). Se puede observar que la presión mínima de las soluciones obtenidas no es inferior a la registrada en la configuración de la red original, ya que, como se estableció en el proceso de optimización, la presión mínima admisible se definió considerando las condiciones de la red original. La Figura 6.4 permite observar que, a medida que disminuye la cantidad de válvulas en la red, las presiones se ajustan hasta alcanzar su estado original.

A modo de ilustración, la tabla 6.1 presenta las condiciones hidráulicas de operación tanto para la red original como para la red sectorizada considerando la solución 1 de la Figura 6.4. Esta solución implica la instalación de 60 válvulas de aislamiento junto con 63 caudalímetros para monitorear la interacción entre las macro DMAs. Como valores de referencia se presentan las presiones mínimas, máximas y promedio de cada macro DMA. Además, se determina la cantidad de caudalímetros y válvulas que limitan cada uno de las macro DMAs.

TABLA 6.1: Condiciones de operación para la solución con 60 válvulas obtenida en la segunda etapa

DMA	Red original			Macro DMAs			Límites de DMAs	
	$P_{min}(m)$	$\langle P \rangle (m)$	$P_{max}(m)$	$P_{min}(m)$	$\langle P \rangle (m)$	$P_{max}(m)$	N_{Caud}	N_{Valv}
1	11,0	15,7	23,8	7,3	12,9	23,4	11	22
2	9,1	20,0	26,1	6,6	18,2	26,1	15	10
3	12,9	16,3	22,8	8,4	12,4	21,7	17	16
4	6,6	16,7	24,5	6,6	16,5	24,6	5	4
5	3,1	11,7	18,3	3,0	11,5	18,4	14	7
6	9,8	18,4	25,7	6,9	15,6	27,3	16	20
7	9,3	21,0	44,7	9,3	21,0	44,7	24	20
8	9,5	17,4	34,1	5,6	11,6	28,7	17	10
9	11,7	23,9	29,6	11,5	23,8	30,0	7	11
							63	60

En la Tabla 6.1, se puede observar que la macro DMA 7 no muestra cambios en las presiones cuando se segmenta la red. Además, se puede señalar que tres macro áreas (DMAs 4, 5 y 9) muestran presiones promedio y mínimas extremadamente cercanas, con una diferencia de no más de 0,2 m de las presiones iniciales, y presiones máximas que muestran un aumento de no más de 0,4 m. Por otro lado, la DMA 8 se destaca como el área con la mayor disminución en las presiones promedio con una notable caída de 5,8 m en la presión promedio, alcanzando un valor de 11,6 m para la red sectorizada. Además, la presión mínima disminuye de 9,5 m a 5,6 m en esta DMA. La DMA 3 registra la mayor disminución en la presión mínima, con una caída de 4,5 m. Aunque hay reducciones en las presiones promedio, estas permanecen por encima de la presión requerida por la Empresa, garantizando el nivel de servicio original. En cuanto a la presión máxima solo dos macro DMAs (DMAs 3 y 8) muestran una disminución, mientras que se observa

un aumento en otra (DMA 6), y en las áreas restantes la presión máxima permanece constante, con variaciones dentro del rango de $\pm 0,4$ m.

6.3. Análisis de Velocidades

Distintos investigadores han reconocido la velocidad del flujo de agua dentro de las tuberías como un factor determinante para evaluar el rendimiento del sistema hidráulico (Botella Langa et al., 2022; Cassiolato et al., 2021). De acuerdo con algunos estudios (Massoud and Zia, 2003; Tabesh and Saber, 2012) las velocidades óptimas deben estar dentro del rango de $0,8 \leq V_{opt} \leq 1,0$ m/s. Sin embargo, la Central Public Health and Environmental Engineering Organization (CPHEEO) recomienda una velocidad mínima de 0,6 m/s para reducir el riesgo de corrosión y deposición, y una velocidad máxima de 1,42 m/s para minimizar el riesgo de golpe de ariete. Durante el análisis de la red DLZ, se detectaron velocidades elevadas en ciertas tuberías, lo que motivó la inclusión de una nueva etapa para reemplazar las tuberías que presentan altas velocidades dentro del sistema de distribución de agua. Esta propuesta se basa en la instalación de conductos con diámetros superiores a los actualmente existentes, teniendo en cuenta los diámetros de las tuberías interconectadas tanto aguas arriba como aguas abajo.

Se identificaron cuatro escenarios diferentes que abarcan diferentes velocidades en el sistema y se evaluó el número de tuberías que presentan flujos dentro de cada rango de velocidad. Durante este análisis, se investigó la influencia de los cambios de diámetro en las presiones de la red DLZ. Los cuatro escenarios propuestos consideraron tuberías con velocidades de flujo superiores a: 3 m/s, 2,5 m/s, 2 m/s y 1,5 m/s. Dentro de cada intervalo de velocidad, se detectaron las tuberías con diámetros nominales menores a 600 mm.¹

Se llevó a cabo la identificación de todas las conexiones asociadas con tuberías que mostraron velocidades dentro de los rangos examinados. Durante este proceso, se analizó

¹La limitación en el diámetro de las tuberías con que se trabajó fue una decisión de la empresa. AySA estableció que las tuberías con diámetros mayores a 600 mm se encuentran instaladas bajo las calles y no las veredas, lo que implicaría un costo mucho mayor para poder realizar las modificaciones y un trabajo de planificación de obras adicional.

la dirección del flujo en cada una de estas tuberías. En la Figura 6.5 se ilustra un ejemplo específico, donde la tubería **X** se destaca en color azul como un elemento con velocidad elevada, mostrando flujo desde el nodo x_1 hasta el nodo x_2 . El primer paso fue determinar todas las tuberías conectadas al nodo x_1 (**A₁**, **A₂** y **A₃**). Posteriormente, se seleccionaron las tuberías que contribuyen al flujo de la tubería **X**, es decir, **A₁** y **A₂**. De entre estas tuberías aguas arriba del nodo x_1 , se seleccionó la que tenía el mayor diámetro. Luego, se identificaron todas las conexiones asociadas con el nodo x_2 , que en este caso son **B₁**, **B₂** y **B₃**. Se seleccionaron las tuberías a las que contribuye flujo la tubería **X**, en este caso, **B₁** y **B₂**. De entre estas tuberías aguas abajo, se eligió la que tenía el menor diámetro. Finalmente, con los dos diámetros seleccionados, el mayor aguas arriba y el menor aguas abajo, se calculó el promedio de ambos. Posteriormente, se substituyó el diámetro comercial más cercano (redondeando hacia arriba) a la tubería en estudio **X**.

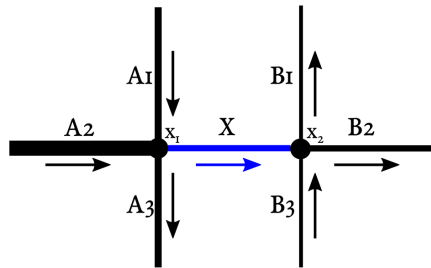


FIGURA 6.5: Esquema de selección de diámetros.

Tras el análisis de distintos escenarios de velocidad, se presentan las condiciones operativas de la red en la Tabla 6.2. Se evaluó el índice de resiliencia (I_R) para cada escenario de velocidad (V) con el fin de examinar el impacto del reemplazo de tuberías. Se identificaron el número de tuberías por intervalo (N_T), las válvulas con indicaciones de altas velocidades (N_V), así como la presión máxima (P_{max}), mínima (P_{min}) y promedio ($\langle P \rangle$) de toda la red. Adicionalmente, se calcularon las variaciones en las presiones nodales tras el reemplazo de tuberías en comparación con la red sectorizada, registrando en la tabla el incremento máximo en la presión nodal ($(\Delta P)_{Max}$), la variación promedio de la presión ($\langle \Delta P \rangle$) y la disminución mínima de la presión nodal ($(\Delta P)_{Min}$).

Se encuentra que la presión máxima (P_{max}) se mantiene invariable en 44,7 m para todos los rangos de velocidades estudiados. De manera similar, la presión mínima (P_{min}) se

TABLA 6.2: Condiciones de operación para cada escenario de velocidades en m/s. Longitudes y presiones expresadas en m.

V	I_R	N_T	N_V	L_T	P_{max}	P_{min}	$\langle P \rangle$	$(\Delta P)_{Max}$	$\langle \Delta P \rangle$	$(\Delta P)_{Min}$
3,0	0,556	10	8	31,4	44,7	3,0	16,1	5,4	0,2	-0,2
2,5	0,557	18	12	124,3	44,7	3,0	16,1	6,5	0,2	-0,1
2,0	0,559	46	18	406,4	44,7	3,0	16,2	6,6	0,3	-0,7
1,5	0,571	144	44	3498,2	44,7	3,2	16,7	8,4	0,8	-2,0

mantiene en 3,0 m para los tres primeros escenarios, incrementándose ligeramente a 3,2 m en el último escenario. Esto indica que las modificaciones en los diámetros de las tuberías seleccionadas no influyen en las presiones extremas (máxima y mínima) en la red. En relación con la presión promedio de toda la red ($\langle P \rangle$) se observa un aumento gradual conforme se analizan intervalos de menor velocidad. Los valores promedio oscilan entre 16,1 m para los dos primeros intervalos hasta 16,7 m para el intervalo de velocidad más baja. El análisis del aumento máximo de presión ($(\Delta P)_{Max}$) refleja esta tendencia, mostrando que a medida que se analizan velocidades menores, los incrementos máximos en las presiones aumentan, pasando de 5,4 a 8,4 m. Asimismo, la variación promedio de presión ($\langle \Delta P \rangle$) también muestra un aumento progresivo, desde 0,2 hasta 0,8 m en consonancia con el aumento en el número de tuberías reemplazadas, lo que indica mayores fluctuaciones en las presión de la red a medida que se extiende el análisis. Al analizar la disminución mínima de presión ($(\Delta P)_{Min}$) se detecta una reducción desde 0,1 m en el primer escenario hasta 2,0 m en el último, lo que indica que a menores velocidades se producen caídas de presión más significativas en la red. Es importante señalar que, al analizar las zonas con mayores pérdidas de presión, no se hallan correlaciones con áreas de baja presión.

La Tabla 6.2 indica que, para el primer intervalo analizado (tuberías con velocidades mayores a 3 m/s), se requiere el reemplazo de 10 tuberías con una longitud total de 31,4 m, y la modificación de 8 válvulas. En el caso de las tuberías con velocidades mayores a 1,5 m/s (incluyendo los intervalos anteriores), la longitud total ascienda a 3498,2 m, abarcando 144 tuberías y 44 válvulas que deben considerarse para reemplazos.

El gráfico de la Figura 6.6 representa el número de tuberías en función de sus velocidades (en m/s) para tres configuraciones diferentes de la misma red: (A) Red original, (B)

configuración obtenida luego del diseño de las macro DMAs, y (C) configuración final después de la tercera etapa, considerando el escenario con velocidades mayores a 1,5 m/s.

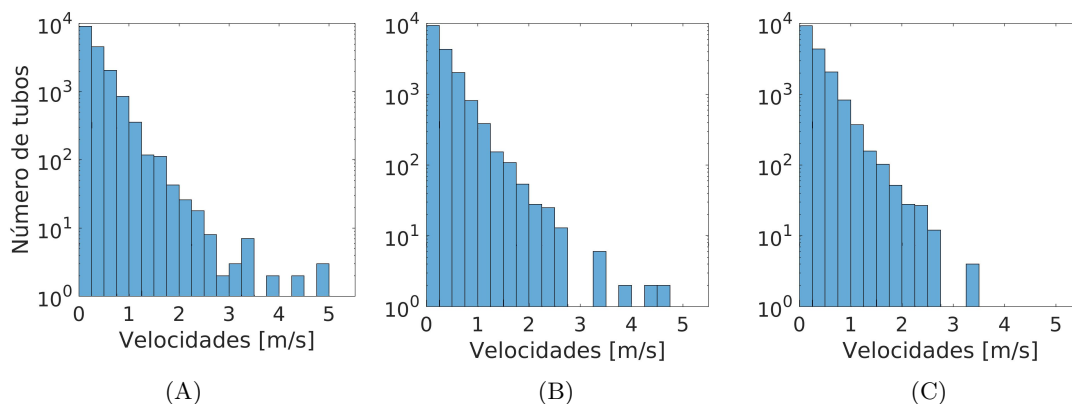


FIGURA 6.6: Histogramas de velocidades de la red (A) Red Original, (B) Red sectorizada y (C) Red sectorizada y modificada para las velocidades mayores que 1,5

Las gráficas para las tres redes presentadas revelan que la distribución de velocidades exceden el rango recomendado de 0,6 a 1,42 m/s. Aunque la sectorización de la red logra una disminución en la cantidad de tubos con elevadas velocidades, persiste un número considerable de tuberías que aún exhiben velocidades que superan ampliamente el rango recomendado. Un análisis comparativo de la Figura 6.6(C) con las configuraciones anteriores revela que el reemplazo de tuberías tiene un impacto significativo en la distribución de las velocidades. Este proceso no solo reduce la velocidad máxima sino también el número de tuberías con velocidades elevadas, optimizando así la distribución general de velocidades de la red.

La Figura 6.7 representa la variación de presión en cada nodo después de la tercera etapa en comparación con la red sectorizada. Esta variación se obtiene restando a la presión nodal obtenida luego de la tercera etapa, la presión nodal en la red sectorizada (segunda etapa). Cada punto en el gráfico representa el número de nodos que registran esta variación de presión en cada intervalo de velocidad. Se muestra cómo las variaciones de presión en la red aumentan a medida que se analizan velocidades más bajas. Los diamantes verdes (que representan el escenario de análisis de velocidades mayores a 1,5 m/s) se sitúan por encima de los demás, tanto para incrementos como para pérdidas

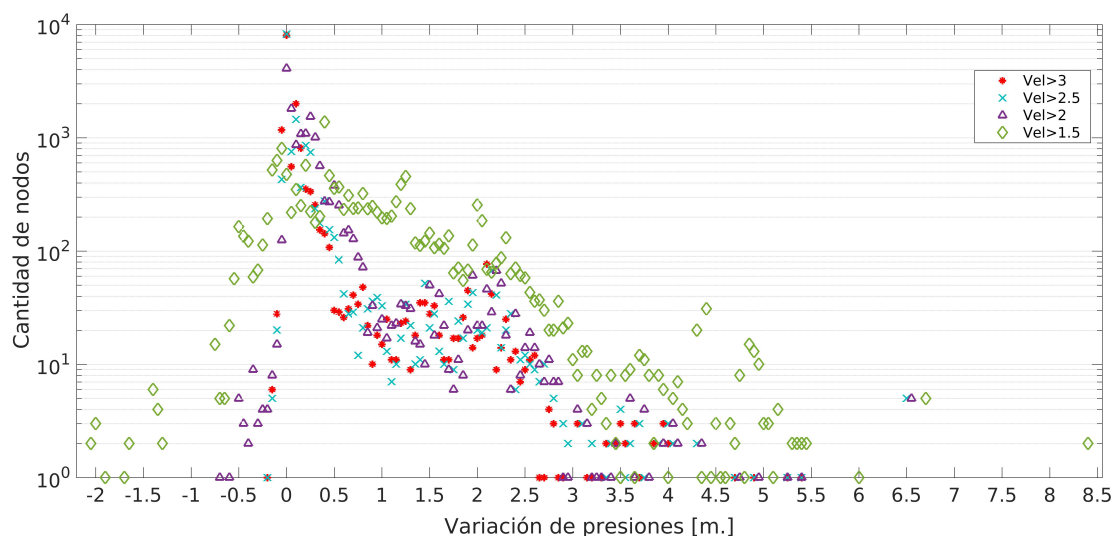


FIGURA 6.7: Variación de presiones nodales para cada iteración según la velocidad de criterio.

de presión. En los escenarios donde se estudiaron las velocidades mayores a 3, 2,5 y 2 m/s, la mayoría de los nodos no se ven afectados por las modificaciones realizadas. El gráfico revela que la variación de las presiones en la mayoría de los nodos es nula. En contraposición, en el cuarto escenario ($V \geq 1,5$ m/s) se observa que el pico de variaciones es de +0,3. Esto indica que la mayor parte de los nodos experimentaron un pequeño aumento en las presiones. Además, los resultados obtenidos para el intervalo de velocidad más bajo (diamantes verdes) se diferencian claramente de los demás intervalos de estudio, confirmando que este intervalo tiene el mayor impacto en las presiones de la red. Además de los aumentos de presión, este intervalo también muestra las mayores magnitudes de pérdida de presión y el mayor número de nodos con pérdidas. Sin embargo, es importante destacar que estas zonas de pérdida de presión no están asociadas con sectores de presión deficiente ni están cercanas a los límites operativos de servicio.

6.4. Conclusiones

En esta Capítulo se ha abordado el proceso de sectorización de una red de gran tamaño ubicada en la Provincia de Buenos Aires. La metodología propuesta mostró una notable versatilidad al enfrentar la limitación de diseñar DMAs independientes, posibilitando la

creación de macro DMAs interconectadas. El objetivo principal fue minimizar la cantidad de tuberías abiertas entre las macro DMAs con el fin de simplificar el análisis de los flujos de entrada y salida de agua en cada distrito, proporcionando así una descripción más clara del funcionamiento de la red. Durante el análisis de las condiciones hidráulicas antes de la sectorización de la red DLZ, se detectaron niveles de presión excepcionalmente bajos, alcanzando incluso los 3,1 m. A pesar de esta situación, la metodología demostró una capacidad notable para identificar configuraciones viables en la sectorización de la red. Esta estrategia cumplió con los límites establecidos y generó una reducción mínima en las presiones del sistema. Particularmente significativo fue el caso de una solución dentro del conjunto Pareto para la DMA que inicialmente presentaba una presión mínima de 3,1 m antes de la sectorización, y experimentó una ligera disminución a 3,0 m luego de la sectorización. Además, la presión promedio en esta DMA pasó de 11,7 m a 11,5 m en la red sectorizada. Estos resultados resaltan el potencial de la metodología desarrollada para minimizar las conexiones entre DMAs sin comprometer los niveles de presión requeridos.

En la tercera etapa de estudio de la red DLZ, se llevó a cabo un análisis de las velocidades del flujo con el objetivo de identificar aquellas tuberías que excedían las velocidades de diseño deseadas, es decir, entre 0,6 y 1,42 m/s. En este proceso, se propusieron cambios en los diámetros de esas tuberías con el fin de mejorar las condiciones de velocidad y optimizar el funcionamiento de la red. Este análisis reveló que las velocidades del flujo tenían un impacto directo en las presiones en la red. Se evaluaron el número de intervenciones necesarias, las variaciones en las presiones y el impacto en la resiliencia de la red que implicaría el reemplazo de las tuberías en cada intervalo de velocidad. En términos generales, las modificaciones propuestas en las tuberías que presentaban velocidades superiores tendieron a aumentar las presiones en los nodos de la red. Sin embargo, este incremento en las presiones conllevó pérdidas de presión en ciertas áreas de la red que no estaban asociadas con zonas de presión insuficiente o con problemas de servicio no satisfecho. Esto sugiere que las intervenciones propuestas, a pesar de las pérdidas de presión ocasionadas, no afectaron negativamente la calidad del servicio en términos de presión en la red de distribución.

Capítulo 7

Estudio de Red Real: NDLZ

En este capítulo se adapta la metodología propuesta en los capítulos anteriores a nuevas condiciones de una red. Se trata de la red DLZ, que fue estudiada en el capítulo anterior, pero considerando un plan de mejora y un proyecto de sectorización diseñado por la empresa AySA para un sector específico de la red. Se explora en detalle la interacción entre las DMAs y el funcionamiento de la red sectorizada bajo estas nuevas condiciones.

7.1. Red NDLZ

En el Capítulo 6 se analizó la red DLZ y se encontró que las condiciones de servicio eran deficientes, con presiones cercanas a los 3,0 m. Con el objetivo de mejorar las condiciones hidráulicas de la red, la Empresa estableció en 5,0 m la presión mínima deseada. Para abordar este problema el equipo de AySA desarrolló un plan de refuerzo. Además, un área de la Empresa había diseñado un modelo de sectorización para el sector este de la red, resaltado en rojo en la Figura 7.1. Este diseño se realizó sin recurrir a un proceso de optimización formal, utilizando características como el número de nodos o la longitud de tuberías en cada área como criterios de diseño. El nuevo modelo se designó como NDLZ.

La propuesta presentada por la Empresa implica la implementación de dobles cañerías y promete mejoras significativas en cuanto al control de la distribución. Requiere una

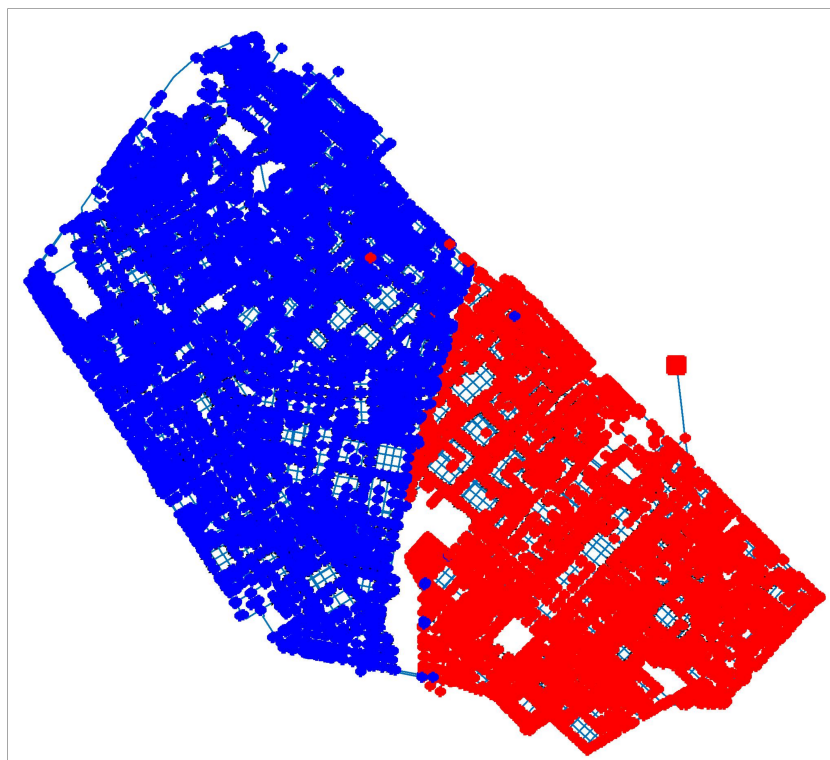


FIGURA 7.1: Red NDLZ. Identificado en color rojo el sector este de la red que cuenta con DMAs diseñados con sistema de doble cabezera.

reestructuración sustancial de las tuberías preexistentes en la red, puesto que el proyecto incluye la instalación de una nueva tubería paralela a la existente en los límites de cada DMA, creando así un sistema de tuberías duales que separa a los usuarios de cada área. Sin embargo, duplicar tuberías en ciertas áreas de la red contradice el principio de simplicidad y reducción de la redundancia que se busca con el diseño de las DMAs para el análisis hidráulico. Además, la introducción de nuevas tuberías también plantea algunas incertidumbres de naturaleza económica. No solo por el costo de implementación y las obras necesarias para la reestructuración, sino también por la inversión necesaria para impulsar una mayor cantidad de agua a una presión adecuada.

7.2. Sectorización de la Red NDLZ

Después de analizar el diseño del sector este presentado por la Empresa, se determinó que el sector oeste (resaltado en color azul en la Figura 7.1) debería diseñarse de modo

que las dimensiones de las nuevas DMAs sean similares. Se estableció que el número óptimo para el sector oeste sea de 13 DMAs. La sectorización de la red se llevó a cabo en dos etapas, siguiendo el mismo enfoque utilizado en el Capítulo 6 para la red DLZ. Los objetivos se centraron en la detección de las estructuras de comunidad y la ubicación de los dispositivos de control o aislamiento en el sector oeste. Es importante destacar que el diseño de las DMAs en el sector oeste se desarrolló teniendo en cuenta las condiciones hidráulicas de toda la red y considerando al sector este como una única área.

7.2.1. Detección de comunidades

En la primera etapa se identificaron 13 comunidades para el sector oeste de la red. En la Figura 7.2 se muestran las estructuras detectadas. Los límites de estas áreas se establecieron utilizando un conjunto de 150 tuberías.

7.2.2. Diseño de DMAs

El análisis del sistema hidráulico de la red NDLZ se realizó utilizando el enfoque de análisis PDA. Se estableció la presión mínima en 0 m, y la presión de servicio se fijó, por requerimiento de AySA, en 5 m. Como se concluyó en el Capítulo 5, el objetivo de esta etapa es minimizar tanto la pérdida de resiliencia como el número de caudalímetros requeridos para las conexiones entre las DMAs en la red. En la Figura 7.3 se presentan los resultados obtenidos en la segunda etapa de sectorización de la red NDLZ. El conjunto de Pareto obtenido está compuesto por 52 soluciones.

En la Figura 7.4 se presentan los diagramas de caja y bigotes de todas las presiones nodales de la red, tanto para la configuración inicial (R.O.) como para las 52 soluciones obtenidas después de la segunda etapa de optimización. Las soluciones están ordenadas de izquierda a derecha según el número decreciente de válvulas. Se observa que a medida que el número de válvulas disminuye, las presiones tienden a recomponerse hasta alcanzar el mismo nivel de la configuración inicial. Entre las soluciones analizadas, se selecciona la solución número 4, ya que presenta el mayor número de cierres (válvulas a instalar) con el rango intercuartil inferior más alto, lo que indica que tiene las presiones

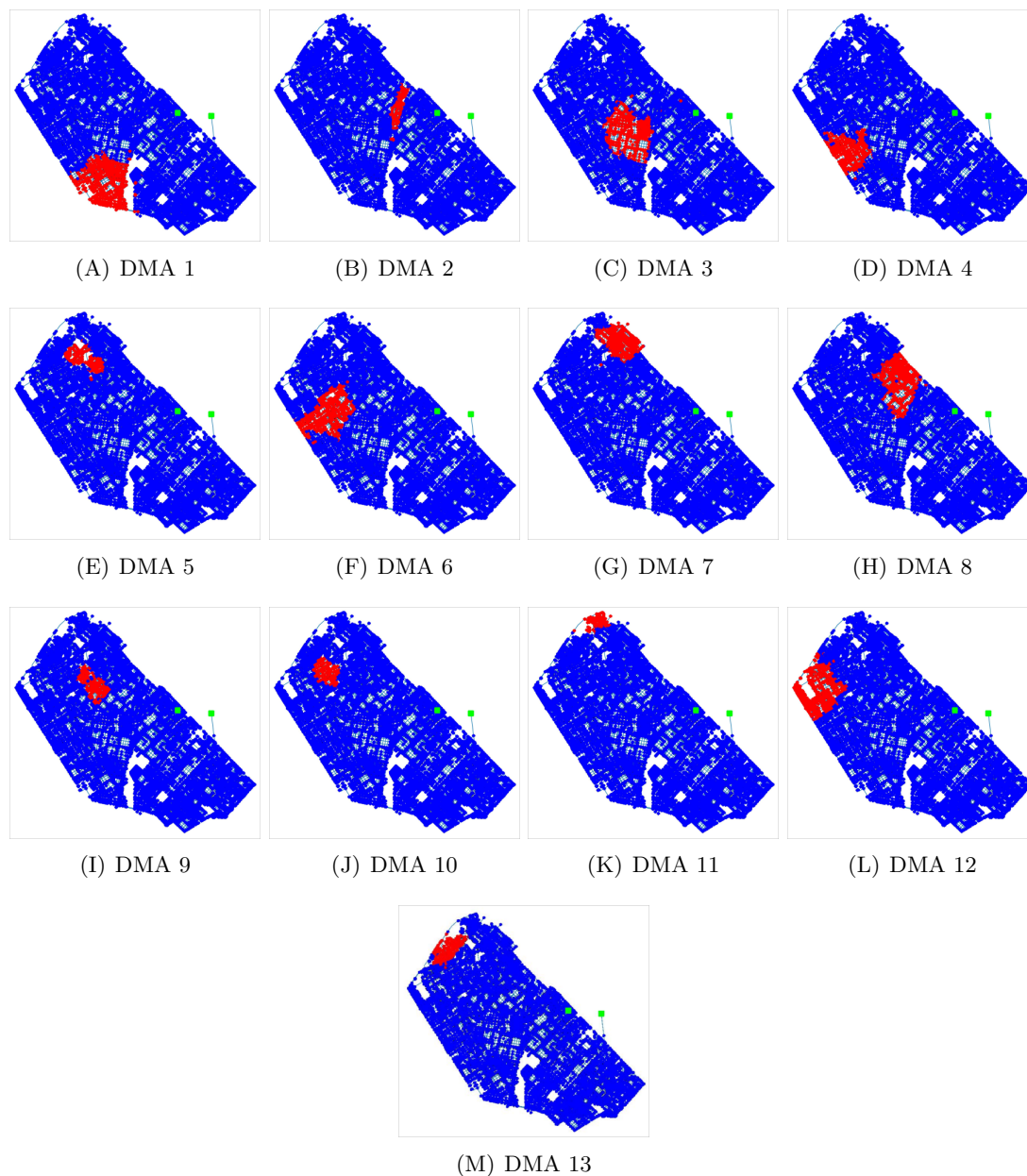


FIGURA 7.2: Distritos obtenidos para el sector oeste de la red NDLZ.

bajas más altas. Esta solución tiene 104 elementos de aislamiento y 46 caudalímetros, y el límite inferior del rango intercuartil es de 5,1 m, que es mayor que la presión requerida de servicio de 5 m. Esta solución registra solo 10 nodos con presiones menores a 7 m, de los cuales, la mitad corresponden a nodos del sector este que ya presentaban esta condición previo a la sectorización. Además, solo se identifican dos nodos con presiones notablemente inferiores a la presión requerida de servicio. El valor atípico que se presenta

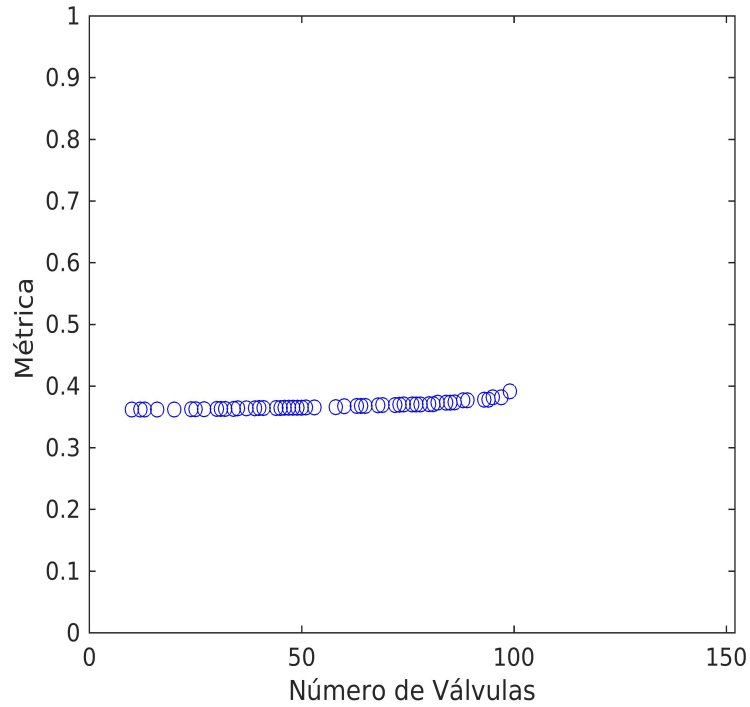


FIGURA 7.3: Conjunto de Pareto de soluciones de la segunda etapa para la red NDLZ.

para todas las configuraciones corresponde a un nodo con presión de 1,32 m, ubicado en el sector este de la red. Este nodo es un nodo sin demanda que se encuentra en la toma de agua de la bomba que corresponde a una fuente de alimentación (R_2). El segundo nodo que registra una presión aún menor que el anterior corresponde al área sectorizada de la red y se puede observar en la Figura 7.4 que se mantiene hasta la solución 17, por lo que se acepta la solución y se propone estudiar la condición hidráulica de este nodo en particular.

La configuración final de la red, correspondiente a la solución seleccionada (número 4) se muestra en la Figura 7.5. Se señalan las ubicaciones de las válvulas y los caudalímetros que definen cada DMA. Los tubos en los que se deben instalar válvulas de aislamiento se indican con banderas rojas, mientras que las banderas celestes representan los puntos de conexión entre las DMAs donde se instalarán los caudalímetros.

En la Figura 7.6 se muestran las presiones nodales para cada DMA considerando la configuración de red original como la red sectorizada con todas las válvulas instaladas

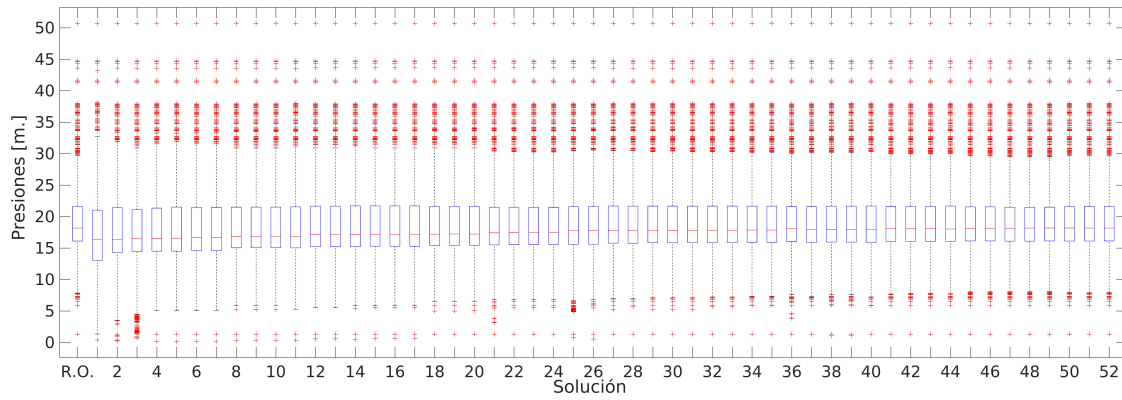


FIGURA 7.4: Diagrama de cajón y bigote de cada solución obtenida para el conjunto de Pareto de soluciones de la segunda etapa.

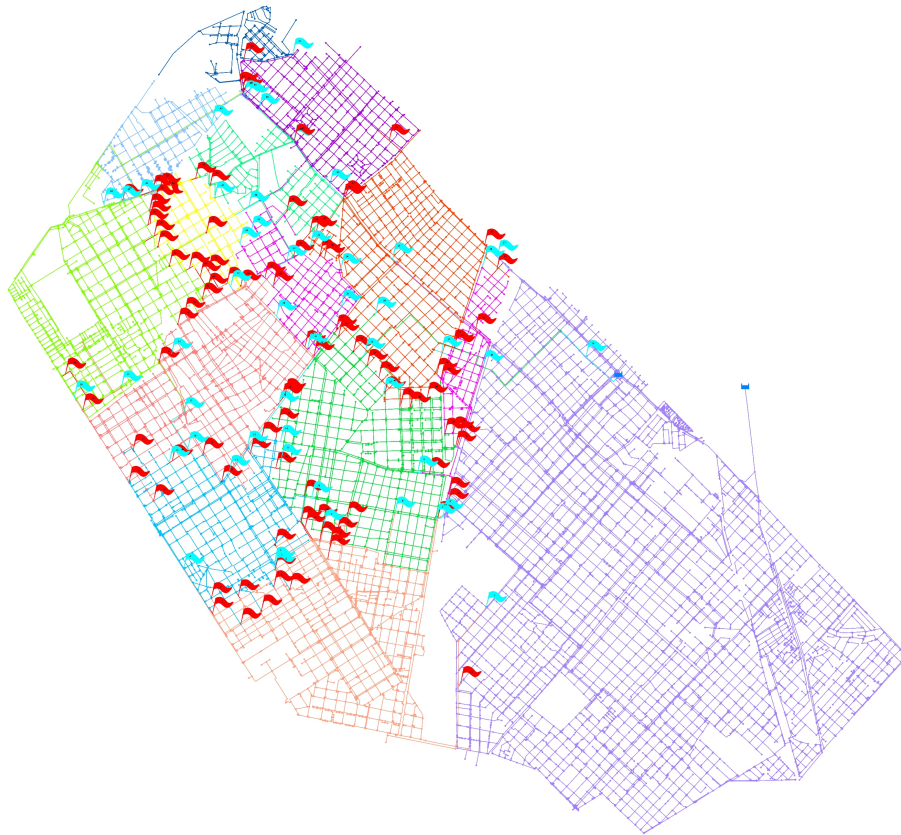


FIGURA 7.5: Posición final de los caudalímetros y de las válvulas de aislación para la solución seleccionada.

y cerradas. La Tabla 7.1 presenta las presiones mínimas ($Min P$), máximas ($Max P$) y promedio ($Prom P$) para cada DMA, tanto para la red original como para la red

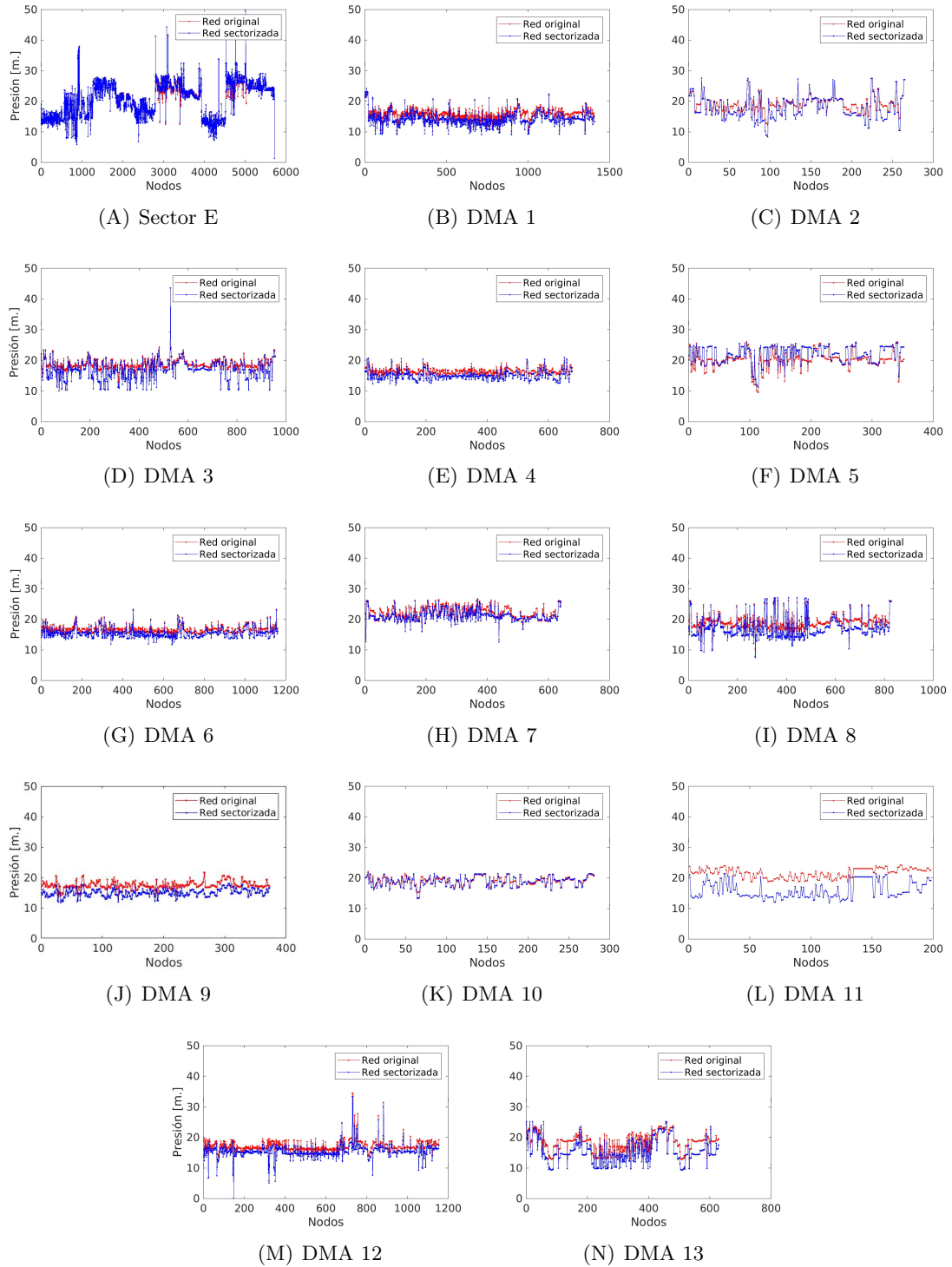


FIGURA 7.6: Presiones nodales por distritos para la red NDLZ original y optimizada.

sectorizada. Al comparar las presiones promedio de las DMAs entre la red original y la red sectorizada se observa que solo la DMA 5 experimenta un aumento de presión de 1,8

m. Por otro lado, las DMAs 7 y 10 experimentan una pérdida de presión promedio de menos de 1 m, mientras que 6 DMAs (1, 2, 3, 4, 6, y 12) experimentan una disminución entre 1 y 2 m, y 3 DMAs (8, 9 y 13) experimentan una disminución entre 2 y 3 m. Sin embargo, la DMA 11 experimenta la mayor pérdida promedio de presión de 5,6 m.

TABLA 7.1: Presiones características para la red NDLZ original y sectorizada

DMA	Red Original			Red Sectorizada		
	<i>Min P</i>	<i>Max P</i>	<i>Prom P</i>	<i>Min P</i>	<i>Max P</i>	<i>Prom P</i>
Sector Este	1,3	50,7	20,6	1,3	50,7	20,7
1	10,2	24,2	15,7	9,1	24,2	14,2
2	12,3	27,5	19,4	8,3	27,5	17,5
3	11,9	43,6	18,7	10,1	43,6	17,0
4	14,2	20,7	16,5	12,0	21,0	15,0
5	9,6	26,0	20,1	11,3	25,8	21,9
6	13,2	23,3	16,7	11,7	23,0	15,5
7	13,3	26,7	22,0	12,5	26,5	21,2
8	9,9	26,2	19,2	7,5	27,1	17,0
9	13,7	21,6	17,5	11,9	18,0	15,0
10	15,2	22,1	19,1	13,3	21,8	18,8
11	18,7	24,2	21,6	11,9	21,4	16,0
12	9,9	34,5	17,2	0,1	33,3	15,5
13	12,9	25,2	18,5	9,3	25,2	15,6

Al examinar la Figura 7.6 y la Tabla 7.1 se observa que no hay cambios sustanciales en el sector este entre la red original y la red sectorizada, ya que las presiones permanecen constantes en la mayoría de los nodos. En la red original, la presión más baja se registra en el sector este, alcanzando 1,3 m, y este valor permanece constante después de la sectorización. En la DMA 5 (Figura 7.6 (F)), se observa que las presiones en la red sectorizada son superiores que en la red original. La Tabla 7.1 muestra que en esta DMA tanto la presión mínima como promedio aumentan, mientras que la presión máxima baja ligeramente. En el caso de la DMA 11 hay una disminución general en las presiones nodales (Figura 7.6 (L)). Además, la Tabla 7.1 muestra que la presión mínima registrada en la DMA para la red sectorizada disminuye 6,85 m quedando en 11,85 m, mientras que el promedio del área disminuye 5,64 m hasta alcanzar 15,96 m, superando ampliamente la presión requerida y garantizando el servicio en el sector. La Figura 7.6 (M) revela que en la DMA 12 se generan descensos puntuales en algunas de las presiones nodales, siendo esta área donde se registra la presión más baja de la red (0,11 m). El nodo que registra

la menor presión de la red poseía una presión inicial de 7,52 m antes de la sectorización. El diámetro del tubo que alimenta a este nodo es de 67,8 mm. Al sustituirlo por una tubería de 75 mm, se constata un incremento en la presión a 3,21 m; mientras que al seleccionar un diámetro de 100 mm, la presión puede aumentar hasta 6,6 m. La longitud total de la tubería es de 86,09 m y se propone realizar este cambio para incrementar la presión. La DMA 13 presenta caídas de las presiones en la red sectorizada. Sin embargo, la Tabla 7.1 muestra que la presión promedio desciende 2,94 m llegando a 15,45 m, lo que supera la presión requerida de 5 m y garantiza el servicio en el área. En las demás DMAs, las presiones de la red sectorizada mantienen valores similares a los de la red original, lo que indica que el diseño de la sectorización no afecta el nivel de servicio y permite simplificar el análisis y control de una red de gran extensión como la red NDLZ.

7.3. Balances de masa de las DMAs

El balance hídrico es un proceso esencial para cuantificar los flujos de agua dentro de la red y caracterizar integralmente el sistema hidráulico. Este proceso consiste en evaluar tanto las entradas como las salidas de agua en cada DMA de la red de distribución.

Para la red NDLZ, se analizaron los caudalímetros definidos en la segunda etapa y se determinó la dirección del flujo en cada tubo entre DMAs. La Figura 7.7 muestra la dinámica de interacción entre las DMAs. Cada DMA está representada por una circunferencia cuyo tamaño es proporcional a la extensión del área que abarca. Los datos presentados en cada DMA incluyen la longitud de las tuberías (L) dentro del área en metros y el número de nodos (N). La DMA 1 es el área con la mayor longitud de cañerías y el mayor número de nodos, mientras que la DMA 11 es la DMA más pequeña diseñada. Se pueden establecer tres niveles de tamaño entre las DMAs según el número de nodos dentro de cada área. Las DMAs más pequeños son la 2, 5, 9, 10 y 11 (DMAS con $N < 400$); mientras que aquellas correspondientes a un tamaño intermedio son las DMAs 3, 4, 7, 8 y 13 (DMAS con $400 \leq N \leq 900$) y las DMAs más grandes son la 1, 6 y 12 (DMAS con $N > 900$).

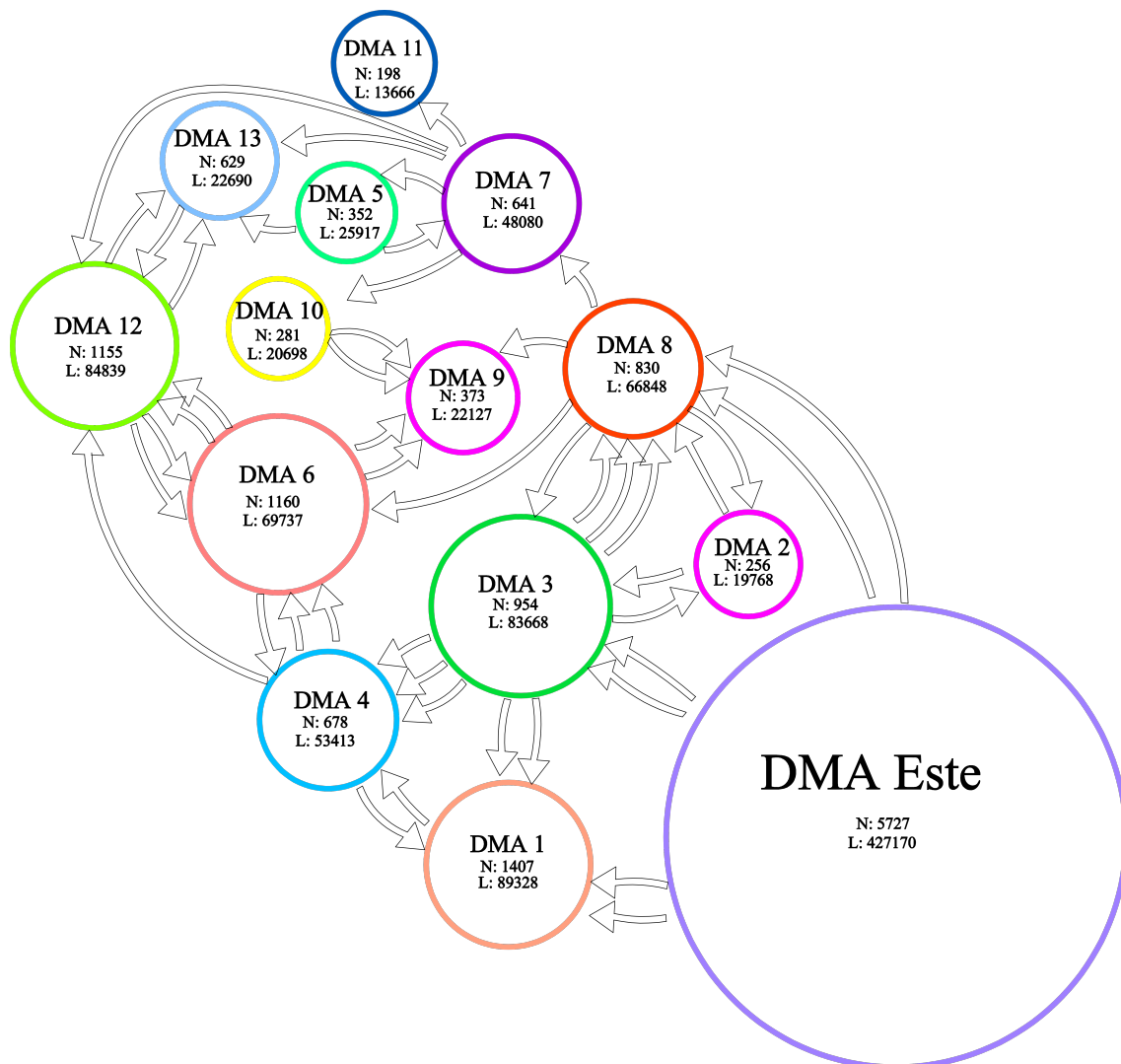


FIGURA 7.7: Caracterización del sistema hidráulico sectorizado

A continuación se presenta el balance hídrico de dos DMAs: la DMA 1, que es la de mayor extensión, y la DMA 10, que corresponde con una de las más pequeñas diseñadas ¹.

7.3.1. Balance para la DMA 1

Para realizar el análisis de la DMA 1 se utilizó el plano correspondiente al área y el diagrama que muestra las interacciones con los demás DMAs. La Figura 7.8 presenta ambas gráficas, respetando el código de colores. La DMA 1 cuenta con 6 conexiones con

¹El análisis de los demás DMAs se presenta en el anexo de la tesis.

3 áreas vecinas. De estas conexiones 5 corresponden a flujos de abastecimiento al área y 1 es un flujo saliente. La DMA 1 recibe caudales de las DMAs 3, 4 y del sector este y aporta caudal a la DMA 4.

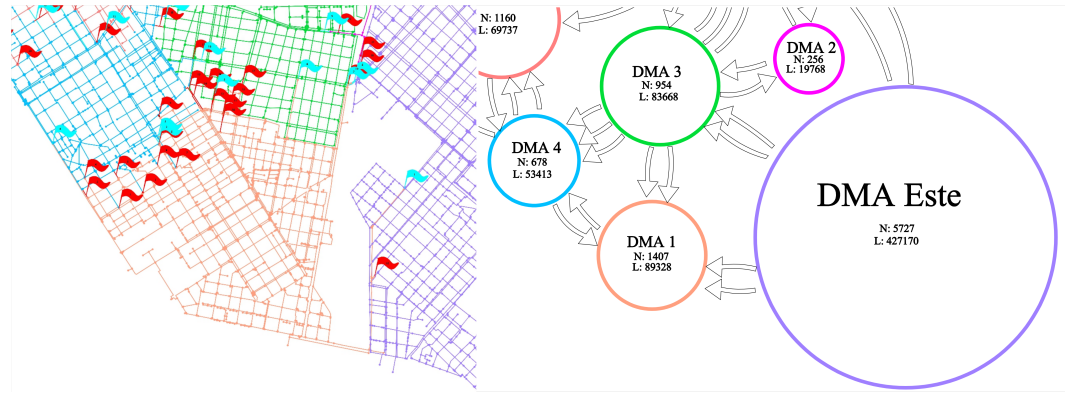


FIGURA 7.8: Análisis de interacción de la DMA 1

La Tabla 7.2 proporciona información de las conexiones entre DMAs, indicando si son flujos de entrada o de salida, junto con el ID del tubo, el diámetro en milímetros y el caudal en m^3/h .

TABLA 7.2: Condiciones de operación de la DMA 1

Condiciones	ID Tubo	Diámetro (mm)	Flujo (m^3/h)
Entradas	'165105'	300	226,6
	'147241'	250	36,9
	'148511'	250	286,0
	'165168'	600	436,4
	'160428'	500	672,0
Salidas	'148508'	400	39,5

En base a la información, se puede calcular que la demanda servida total de esta área es de $1618,4 m^3/h$.

7.3.2. Balance para la DMA 10

De forma similar a la DMA 1, en la Figura 7.9 se presenta el diagrama de las DMAs que interactúan con el área 10. También se presenta la Tabla 7.3 con los datos para las conexiones correspondientes a esta DMA. Se observa que posee una entrada de caudal proveniente de la DMA 7 y dos salidas para abastecer caudal a la DMA 9. La diferencia

entre la entrada y las salidas de agua indican que en esta área el consumo es de 607,7 (m^3/h).

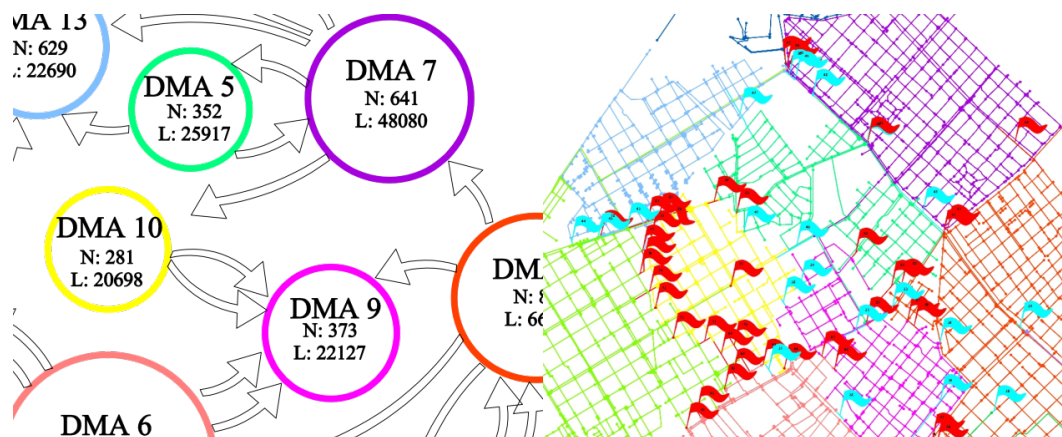


FIGURA 7.9: Análisis de interacción de la DMA 10

TABLA 7.3: Condiciones de operación de la DMA 10

Condiciones	ID Tubo	Diámetro (mm)	Flujo (m^3/h)
Entradas	158400	500	724,2
Salidas	156795	175	88,6
	161241	90	27,9

7.4. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado una alternativa para el diseño de DMAs para el sector oeste de la red NDLZ, buscando que sea compatible con el nuevo plan de refuerzos y el modelo de sectorización propuesto por AySA para el sector este. El objetivo primordial de esta alternativa fue mejorar la eficiencia en la gestión de la red, permitiendo una comprensión más profunda de la dinámica de las DMAs, sin perder resiliencia y garantizando la calidad del servicio.

La optimización para la ubicación de los dispositivos de control y aislamiento en el sector oeste permitió identificar 13 DMAs, cuya gestión se logra con 46 puntos de observación. El análisis de las presiones de la red demostró que la sectorización logra dividir la red en áreas con un impacto mínimo y presenta actividades de saneamiento para abordar las pérdidas de presión puntuales.

Además, la sectorización facilitó la realización de los balances de masa para el control de los flujos de cada DMA. Estos balances de masa se presentaron como un indicador clave para la gestión eficiente de fugas, ya que los cambios en las dinámicas de interacción se pueden observar fácilmente en los balances. En resumen, la implementación de esta alternativa representa un avance significativo en la gestión de redes de distribución de agua, contribuyendo a mejorar la eficiencia operativa y la calidad del servicio ofrecido a los usuarios.

Capítulo 8

Conclusiones

8.1. Conclusiones

En este último capítulo se presentan las conclusiones parciales que se han desarrollado a lo largo de esta tesis, ofreciendo una síntesis completa de los resultados obtenidos. Además, se proponen algunas áreas de investigación futura que han emergido como resultado de este trabajo.

Una de las contribuciones más significativas de esta tesis ha sido el desarrollo de una metodología de dos etapas que permite la adaptación de las redes de agua potable convencionales hacia un enfoque basado en Áreas de Medición de Distritos (DMAs), minimizando las consecuencias negativas que conlleva la implementación de la sectorización en los sistemas hidráulicos. La estrategia innovadora implementada en esta tesis consistió en la sectorización óptima de redes con el objetivo general de simplificar su análisis y gestión. Para esto se tuvo en cuenta el funcionamiento del sistema hidráulico y los objetivos específicos que se buscaban con cada sectorización. Asimismo, la metodología propuesta exhibió una notable adaptabilidad, siendo aplicable tanto para el diseño DMAs con capacidad de operar de manera autónoma como para DMAs interconectadas. Esta flexibilidad permitió ajustarse a los objetivos de gestión y a las condiciones hidráulicas preexistentes.

Desde una perspectiva formal, la sectorización de redes de agua potable constituye un problema de optimización combinatoria clasificado en la categoría NP-completo. Abordar este tipo de desafíos demanda el empleo de algoritmos heurísticos y/o metaheurísticos. En este contexto, se aplicó un algoritmo heurístico del tipo Louvain que es derivado de la teoría de redes complejas. Adicionalmente, se incorporó un algoritmo estocástico conocido como recocido simulado que pertenece a la categoría de metaheurísticas.

La metodología desarrollada en esta tesis se aplicó a varios modelos de redes, y en particular, a una red de agua potable de gran tamaño proporcionada por la principal empresa de servicios de agua de Argentina. A continuación, se resumen las principales conclusiones:

Índice de modularidad topológica y característica

El índice de modularidad topológica, desarrollado originalmente en el contexto de las redes complejas, demostró una notable eficacia para la detección de estructuras de comunidades en redes de distribución de agua potable. En contraste, se observó que el índice de modularidad característica, diseñado específicamente para redes de distribución de agua y que considera atributos de las tuberías o del flujo, mostró limitaciones en la detección de comunidades, especialmente cuando los atributos seleccionados para la segmentación estaban distribuidos de manera aproximadamente uniforme entre todos los nodos. Además, no se logró establecer con claridad cuál es la propiedad más adecuada para asignar a la modularidad característica en el proceso de detección de comunidades. Los atributos utilizados para caracterizar las redes estudiadas se basaron en aspectos del sistema hidráulico, como la presión y el caudal, que fueron calculados al inicio del proceso de optimización. Sin embargo, estas propiedades son inherentes al sistema hidráulico y, por consiguiente, se vieron afectadas por la sectorización; es decir, la detección de las comunidades se realizó empleando características cuyos valores experimentaron cambios como resultado de la sectorización. Por otro lado, se observó que la optimización de la modularidad característica produjo un notable incremento en el número de cortes conceptuales, aproximadamente un 40 % más en comparación con el índice de modularidad topológica. Este resultado contradice el objetivo inicial de identificar la menor cantidad

posible de conexiones entre comunidades, lo cual, a su vez, llevaría a la instalación de un menor número de válvulas en las etapas posteriores del proceso. La conclusión derivada de los casos estudiados señala que el índice de modularidad topológica demostró una mayor capacidad de adaptación y eficiencia en la identificación óptima de las estructuras de comunidades en redes de agua potable, así como en la minimización del número de conexiones entre ellas. Por consiguiente, se eligió como la función objetivo para la primera etapa de la metodología desarrollada.

Detección de comunidades utilizando recocido simulado y Louvain

Se realizaron simulaciones con el propósito de identificar las estructuras de comunidades mediante dos enfoques distintos: el algoritmo metaheurístico recocido simulado y el algoritmo heurístico Louvain. El objetivo principal de estas simulaciones fue maximizar el índice de modularidad en las redes estudiadas. Se encontró que el algoritmo recocido simulado proporcionó múltiples configuraciones debido a su enfoque de optimización multiobjetivo, lo que resultó en un conjunto de soluciones de Pareto. Sin embargo, este algoritmo no permitió controlar, de manera directa, la cantidad de comunidades. Por otro lado, el algoritmo Louvain, con la introducción del parámetro de resolución estructural incorporado en esta tesis para el análisis de las redes de agua potable, permitió determinar el número y tamaño de las comunidades detectadas. Es importante destacar que, mientras que el algoritmo recocido simulado requiere una fase de ajuste para definir los parámetros del algoritmo (temperatura, número de iteraciones, factor de enfriamiento y modo de perturbación), el algoritmo Louvain se caracterizó por su capacidad para generar soluciones de alta calidad, es decir, valores cercanos al óptimo de la modularidad, con una velocidad de ejecución notablemente mayor. En términos de tiempo, el algoritmo Louvain se ejecuta en cuestión de una fracción de segundos (para un red de tamaño medio como TRN o MLN) en comparación con el tiempo del orden de minutos requeridos por recocido simulado. En consecuencia, se decidió seleccionar el algoritmo Louvain como la elección principal para realizar la detección óptima de comunidades (primera etapa) mediante la maximización de la modularidad topológica.

Recocido simulado multiobjetivo SMOSA

La segunda etapa de la metodología propuesta se definió como un problema de dos objetivos contrapuestos: el primero se centró en la optimización de métricas que caracterizan el sistema hidráulico, mientras que el segundo se enfocó en determinar la ubicación óptima del número máximo de válvulas de aislamiento. La formalización de este problema es de naturaleza combinatoria del tipo NP-completo, lo que hizo necesario recurrir a algoritmos metaheurísticos. Para esto se implementó la versión multiobjetivo SMOSA del algoritmo recocido simulado. Esta elección resultó ser computacionalmente eficiente y relativamente simple de implementar en comparación con otras metaheurísticas.

Diseño de Áreas de Medición de Distritos

En la etapa de diseño de las DMAs, se evaluó el comportamiento hidráulico de las redes de agua potable sectorizadas obtenidas bajo tres diferentes criterios de diseño. Uno de estos criterios se basó en la minimización de la pérdida de resiliencia, mientras que los otros dos se apoyaron en el paradigma de similitud de demanda requerida entre las DMAs, utilizando como objetivos tanto el Coeficiente de Gini como la desviación estándar de las demandas. Los resultados revelaron que cada una de las métricas utilizadas tenía un impacto significativamente diferente en la configuración final de las DMAs. Además, los resultados demostraron que las configuraciones obtenidas en el proceso de minimización de la pérdida de resiliencia eran capaces de proporcionar comunidades con una distribución de presiones más uniforme. Este aspecto adquiere gran importancia ya que permite una gestión más eficiente de la red y sienta las bases para una futura ampliación de la metodología con la finalidad de estudiar la minimización de las fugas de agua.

Matriz de adyacencia reducida

Para los casos de estudio TRN y MLN, en los cuales se buscaba diseñar DMAs autónomas, se propuso que las tuberías en la frontera entre dos comunidades vecinas debían estar todas abiertas (es decir, conectadas) o todas cerradas (es decir, con válvulas de aislamiento instaladas). Con el objetivo de simplificar este análisis se construyó una *matriz*

de adyacencia reducida. Esta matriz representó las conexiones entre dos comunidades como un único tubo que englobó todas las tuberías en la frontera. En otras palabras, cada comunidad se consideró como un nodo único, y cada conjunto de tuberías que conectó dos comunidades se representó como una única conexión. Esta estrategia tuvo como resultado una reducción significativa en el número de variables de diseño en el problema de optimización, lo que a su vez impactó en una disminución considerable de la carga computacional requerida para el análisis.

Análisis hidráulico con enfoque PDA

El análisis hidráulico de las redes se llevó a cabo mediante la aplicación del enfoque dirigido por presiones (PDA, por sus siglas en inglés). Esta metodología permitió examinar el grado de satisfacción de las demandas en los casos estudiados, especialmente en aquellos nodos que presentaban condiciones deficitarias de presión. Es importante destacar que, en el contexto de las redes analizadas, la elección del enfoque PDA tuvo un beneficio adicional de gran relevancia. Esta elección habilitó la posibilidad de realizar entregas parciales de suministro, una característica que no habría sido posible evaluar utilizando el enfoque dirigido por demandas (DDA, por su sigla en inglés). En el caso de la red TRN, el análisis hidráulico con enfoque PDA demostró que no se encontraron nodos sin servicio de agua, aunque sí se realizaron entregas parciales de las demandas requeridas. Las soluciones obtenidas lograron satisfacer entre un 97 % y un 98,5 % de las demandas requeridas. En el caso de la red NDLZ, el diseño de las DMAs se realizó utilizando el enfoque PDA. Las soluciones propuestas revelaron la existencia de nodos aislados dentro de la red que presentaban presiones por debajo de la presión requerida de servicio. Para el modelo de sectorización seleccionado, la red presenta sólo dos nodos con presiones por debajo de la requerida: uno previo a la sectorización y un nuevo nodo con presión extremadamente baja. Dado que se trata de una red de gran tamaño, la demanda no entregada resultó ser insignificante en comparación con el caudal total suministrado a la red. Por lo tanto, la gestión de estos nodos se ha estudiado como un caso particular. En los demás casos estudiados, el análisis PDA indicó que las configuraciones presentadas siempre garantizaron el cumplimiento de las demandas requeridas.

Aplicación a redes reales de gran tamaño

La metodología desarrollada se ha destacado por su alta eficacia y versatilidad al abordar la sectorización de grandes redes de distribución de agua, como se puso de manifiesto en su aplicación a la red DLZ proporcionada por Aguas y Saneamientos Argentinos (AySA). En este caso, la metodología exhibió una gran capacidad de adaptación, posibilitando la creación de macrodistritos interconectados. Durante el análisis de las condiciones hidráulicas previas a la sectorización de la red DLZ, se observaron niveles de presión extremadamente bajos, incluso descendiendo hasta los 3,1 m de columna de agua. Aún en este escenario, la metodología demostró una notable capacidad para identificar configuraciones viables para la sectorización de la red, cumpliendo con los límites preestablecidos y generando una mínima reducción en las presiones del sistema en las áreas con niveles más bajos. Particularmente significativo fue el caso de una solución dentro del conjunto Pareto para la DMA que inicialmente presentaba una presión mínima de 3,1 m antes de la sectorización, y experimentó una ligera disminución a 3,0 m después de la implementación. Además, la presión promedio en esta DMA pasó de 11,7 m a 11,5 m en la red sectorizada. Estos resultados resaltan el potencial de la metodología desarrollada para minimizar las conexiones entre DMAs sin comprometer los niveles de presión requeridos.

Análisis post-optimización

Como etapa posterior a la sectorización de la red DLZ, se llevó a cabo un análisis de las velocidades del flujo con el objetivo de identificar aquellas tuberías que excedían las velocidades de diseño deseadas, es decir, entre 0,8 y 1,0 m/s. En este proceso, se propusieron cambios en los diámetros de esas tuberías con el fin de mejorar las condiciones de velocidad y optimizar el funcionamiento de la red. Este análisis reveló que las velocidades del flujo tenían un impacto significativo en las presiones en la red. En términos generales, las modificaciones propuestas a las tuberías que presentaban velocidades superiores tendieron a aumentar la presión en la red en el caso estudiado. Sin embargo, este incremento en las presiones conllevó pérdidas de presión en ciertas áreas de la red que no se asociaron con zonas de presión insuficiente o con problemas de servicio no satisfecho. Esto sugiere que las intervenciones propuestas, a pesar de las pérdidas de

presión ocasionadas, no afectaron negativamente la calidad del servicio en términos de presión en la red de distribución de agua.

Flexibilidad respecto de los objetivos de gestión

La metodología de sectorización es capaz de adaptarse a los objetivos específicos de gestión de las empresas de distribución de agua. Para la sectorización de las redes TRN y MLN se diseñaron DMAs autónomas. En este caso el objetivo de gestión consistía en la creación de comunidades cerradas, un paso necesario para determinar las contribuciones de cada fuente de suministro a los diferentes sectores de la red. Por otro lado, en el caso de la red DLZ, el diseño de DMAs interconectadas se centró en evaluar la interconexión entre las distintas DMAs, permitiendo un conocimiento preciso de los caudales entregados a cada área y la procedencia de cada flujo generado en la interacción entre las DMAs.

Como resultado de las optimizaciones que consideraron diversos objetivos, se ha demostrado que es posible obtener diseños óptimos de DMAs adaptadas a las condiciones hidráulicas de la red y a los objetivos específicos de gestión. El desafío consistió, entonces, en determinar con precisión qué objetivos fueron necesarios considerar en cada caso particular para el diseño óptimo de las DMAs.

En futuras investigaciones, se explorarán nuevos parámetros para la detección de las estructuras de comunidades que estén relacionados con las condiciones de diseño de la red, como la cota y la longitud de las cañerías en cada comunidad, es decir, condiciones que no se vean modificadas por la sectorización de la red. Además, se considerarán otros objetivos de diseño para las DMAs, como la determinación de las áreas de servicio de cada fuente o el tiempo de permanencia del agua en las tuberías.

También se proyecta modelar nuevos escenarios de demanda que permitan simular los cambios que podrían surgir debido al incremento en el número de consumidores de la red que resulte del crecimiento urbano en las ciudades o de cambios demográficos. También se prevé profundizar en el estudio de las variaciones en los patrones de demanda mediante la incorporación de variables difusas en el modelado.

Un aspecto que no ha sido abordado en esta tesis y que merece un análisis profundo es la planificación de la implementación práctica de las DMAs con el fin de prevenir efectos inesperados debidos a la incertidumbre hidráulica. Es fundamental tener en cuenta que la implementación de las DMAs debe llevarse a cabo de manera gradual, y la delimitación parcial de las áreas durante el proceso de implementación puede tener consecuencias negativas si la configuración implementada no coincide con la versión final que se ha analizado.

Como resultado del trabajo realizado en colaboración con la empresa AySA, se ha logrado satisfacer las necesidades de los macrodistritos en la red DLZ. No obstante, se plantea como tema pendiente para investigaciones futuras la subdivisión de cada macrodistrito en sectores más pequeños.

Apéndice A

Balances de masa red NDLZ

En las subsecciones que siguen, se exhiben detalladamente las figuras correspondientes a cada DMA diseñada para la red NDLZ. Las figuras también incluyen el esquema de funcionamiento operativo. Conjuntamente se presenta una tabla que especifica las entradas y salidas de agua para cada DMA adyacente que se observa en el esquema. Esta tabla ha sido completada con la identificación de cada tubería, su respectivo diámetro y el caudal que circula, proporcionando así una visión integral del sistema de distribución de agua.

A.0.1. DMA 1

La DMA 1 cuenta con seis conexiones con tres áreas adyacentes. De estas, cinco son flujos de abastecimiento al área y una presenta un flujo saliente. La DMA 1 recibe caudales de las DMAs 3, 4, así como del sector este, y suministra caudal a la DMA 4.

Según los datos de la Tabla [A.1](#), la demanda total servida de esta área se estima en $1618,4 \text{ m}^3/h$.

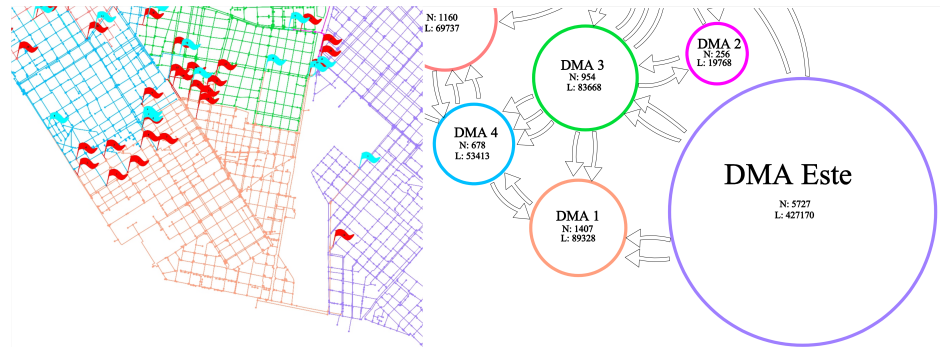


FIGURA A.1: Análisis de interacción de la DMA 1

TABLA A.1: Condiciones de operación de la DMA 1

Condiciones	ID Tubo	Diámetro (mm)	Flujo (m^3/h)	DMA conectado
Entradas	165105	300	226,6	DMA E
	147241	250	36,9	DMA 4
	148511	250	286,0	DMA 3
	165168	600	436,4	DMA E
	160428	500	672,0	DMA 3
Salidas	148508	400	39,5	DMA 4

A.0.2. DMA 2

La DMA 2 cuenta de cuatro conexiones con dos áreas vecinas. Dos de estas conexiones corresponden a flujos de abastecimiento al área y las restantes a flujos salientes. La DMA 2 intercambia caudales a ambas DMAs ayacentes 3 y 8.

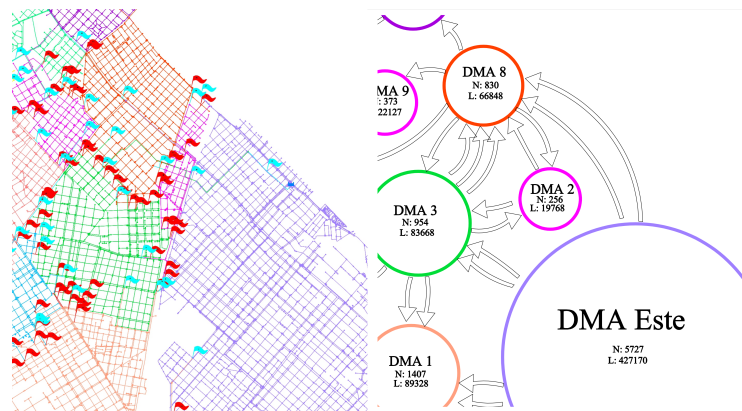


FIGURA A.2: Análisis de interacción de la DMA 2

Con base en la información de la Tabla A.2 la demanda total servida de esta área se calcula en $341,3 m^3/h$.

TABLA A.2: Condiciones de operación de la DMA 2

Condiciones	ID Tubo	Diámetro (<i>mm</i>)	Flujo (m^3/h)	DMA conectado
Entradas	162605	400	609,3	DMA 3
	156936	150	73,9	DMA 8
Salidas	159381	500	321,3	DMA 3
	157641	75	20,6	DMA 8

A.0.3. DMA 3

La DMA 3 cuenta con trece conexiones con cinco áreas vecinas. Cuatro de estas conexiones corresponden con flujos de abastecimiento al área. La DMA 3 recibe caudales de grandes volúmenes de la DMA del este y de la DMA 8. Además es el principal proveedor de agua a la DMA 4. En este caso se observa el caudal mínimo circulante, que es uno de los aportes a la DMA 8, garantiza el nivel de presión de servicio requerido.

TABLA A.3: Condiciones de operación de la DMA 3

Condiciones	ID Tubo	Diámetro (<i>mm</i>)	Flujo (m^3/h)	DMA conectado
Entradas	157338	500	801,3	DMA E
	159381	500	321,3	DMA 2
	160728	800	1039,4	DMA 8
	162602	900	2692,3	DMA E
Salidas	156070	200	38,1	DMA 8
	153289	250	7,6	DMA 8
	158693	700	1578,4	DMA 4
	160428	500	672,0	DMA 1
	161150	150	41,9	DMA 4
	148511	250	286,0	DMA 1
	153339	250	31,4	DMA 8
	160724	500	730,8	DMA 4
	162605	400	609,3	DMA 2

La demanda total servida de esta área, según la Tabla A.3 es de 858,8 m^3/h .

A.0.4. DMA 4

La DMA 4 posee nueve conexiones con cuatro DMAs adyacentes. Cinco de los caudalímetros que conectan las áreas aportan caudales de abastecimiento al área. La DMA

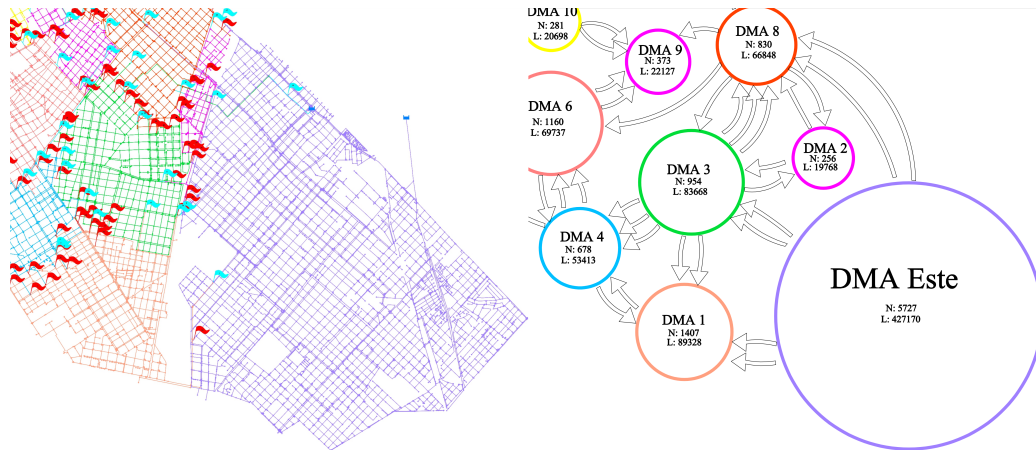


FIGURA A.3: Análisis de interacción de la DMA 3

4 recibe su principal caudal de la DMA 3. Asimismo aporta caudales a las DMAs 12, 1 y 6.

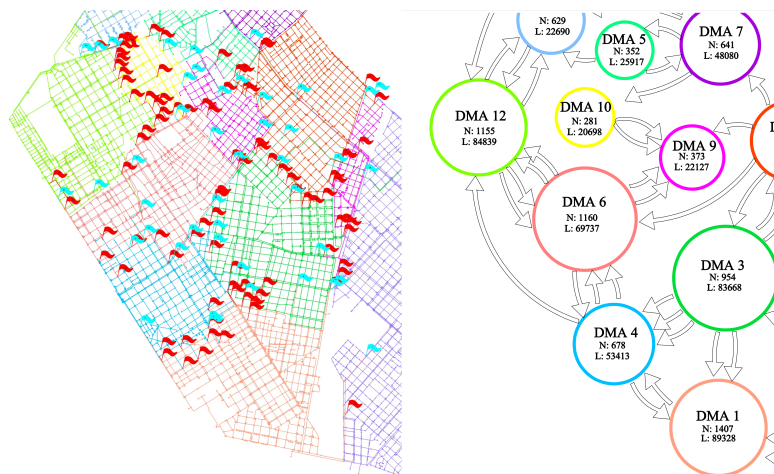


FIGURA A.4: Análisis de interacción de la DMA 4

TABLA A.4: Condiciones de operación de la DMA 4

Condiciones	ID Tubo	Diámetro (mm)	Flujo (m ³ /h)	DMA conectado
Entradas	160724	500	730,8	DMA 3
	148508	400	39,2	DMA 1
	154769	150	43,1	DMA 6
	158693	700	1576,1	DMA 3
	161150	150	41,8	DMA 3
Salidas	158194	150	64,1	DMA 6
	147241	250	36,9	DMA 1
	150697	300	361,7	DMA 6
	162645	450	462,1	DMA 12

Con la información de la Tabla A.4 se establece que la demanda servida total de esta área es de $1506,2 \text{ m}^3/h$.

A.0.5. DMA 5

La DMA 5 cuenta con sólo tres conexiones, dos de las cuales se establecen con la DMA 7, siendo una de entrada y la otra de salida. La tercer conexión es con la DMA 13, al cual aporta un caudal reducido.

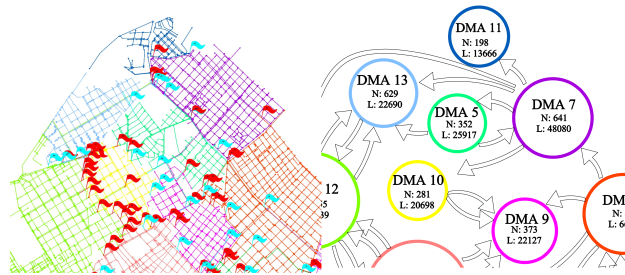


FIGURA A.5: Análisis de interacción de la DMA 5

TABLA A.5: Condiciones de operación de la DMA 5

Condiciones	ID Tubo	Diámetro (mm)	Flujo (m^3/h)	DMA conectado
Entradas	159350	400	376,6	DMA 7
Salidas	158994	225	16,0	DMA 13
	143260	200	89,3	DMA 7

La demanda total servida de esta área, según la Tabla A.5, es de $271,2 \text{ m}^3/h$.

A.0.6. DMA 6

La DMA 6 posee un total de diez caudalímetros que delimitan las conexiones con las DMAs vecinas. Las conexiones se dividen equitativamente entre flujos de entrada y salidas. Esta DMA posee múltiples conexiones con tres DMAs (9, 4 y 12) y una única conexión con la DMA 8, que proporciona el mayor caudal de entrada del área.

La demanda total servida de esta área, basada en la Tabla A.6, se calcula en $979.5 \text{ m}^3/h$.

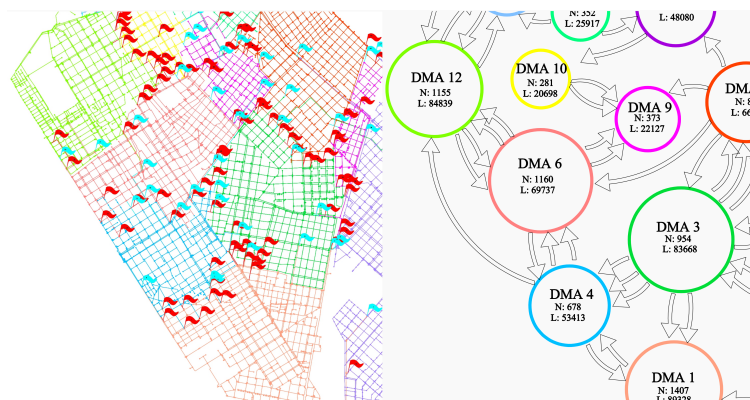


FIGURA A.6: Análisis de interacción de la DMA 6

TABLA A.6: Condiciones de operación de la DMA 6

Condiciones	ID Tubo	Diámetro (mm)	Flujo (m ³ /h)	DMA conectado
Entradas	150697	300	361,7	DMA 4
	151340	300	71,0	DMA 12
	157828	400	455,5	DMA 8
	158194	150	64,1	DMA 4
	162649	200	237,9	DMA 12
Salidas	146563	81,4	14,0	DMA 9
	152381	180,8	40,2	DMA 12
	154769	150	43,3	DMA 4
	155923	226,2	86,1	DMA 9
	154484	144,6	27,2	DMA 12

A.0.7. DMA 7

La DMA 7 posee un total de siete caudalímetros que miden los intercambios con las DMAs adyacentes. La mayoría de las conexiones registran flujos de salidas. Los flujos de abastecimiento de esta DMA provienen de las DMAs 5 y 8.

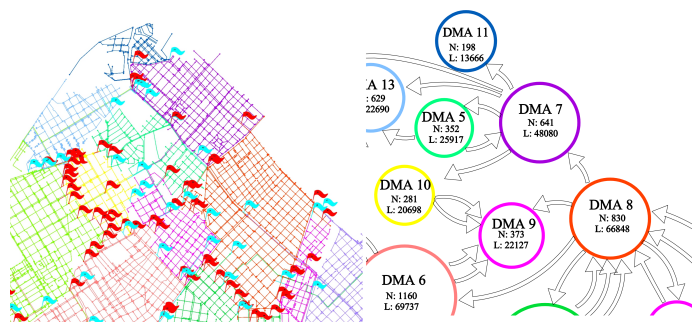


FIGURA A.7: Análisis de interacción de la DMA 7

TABLA A.7: Condiciones de operación de la DMA 7

Condiciones	ID Tubo	Diámetro (mm)	Flujo (m^3/h)	DMA conectado
Entradas	143260	200	89,3	DMA 5
	158627	1067	961,5	DMA 8
Salidas	159350	400	376,6	DMA 5
	158400	500	724,2	DMA 10
	160742	600	128,6	DMA 13
	160744	400	531,6	DMA 12
	161513	250	152,6	DMA 11

Esta DMA posee una de las fuentes de abastecimiento de la red, que es una conexión con otro distrito. En este caso, al poseer una fuente, se observa que el caudal de salida es mayor al caudal de entrada medido por los caudalímetros conectados. Por lo tanto, se realiza la corrección considerando el aporte de caudal del distrito vecino de 1679,0 (m^3/h), resultando en un consumo neto de 816,2 (m^3/h).

A.0.8. DMA 8

La DMA 8 posee once conexiones con cinco DMAs diferentes. Se observa una variabilidad en los caudales, al igual que los diámetros de los tubos que conectan las DMAs. Los caudalímetros instalados registran que de las once conexiones seis corresponden a entrada a la DMA y cinco a salidas.

TABLA A.8: Condiciones de operación de la DMA 8

Condiciones	ID Tubo	Diámetro (mm)	Flujo (m^3/h)	DMA conectado
Entradas	153339	250	31,4	DMA 3
	155894	1067	3183,5	DMA E
	157641	75	20,6	DMA 2
	156070	200	38,1	DMA 3
	153289	250	7,6	DMA 3
	158203	500	400,1	DMA E
Salidas	156936	150	73,9	DMA 2
	157828	400	455,5	DMA 6
	158627	1067	961,5	DMA 7
	160728	800	1039,4	DMA 3
	147839	200	219,0	DMA 9



FIGURA A.8: Análisis de interacción de la DMA 8

Con los caudales registrados en la Tabla A.8 se puede calcular que la demanda servida total de esta área es de $932,0 \text{ m}^3/h$.

A.0.9. DMA 9

La DMA 9 se caracteriza por tener únicamente conexiones de entrada, con tres DMAs contribuyendo al flujo de la zona a través de cinco tuberías.

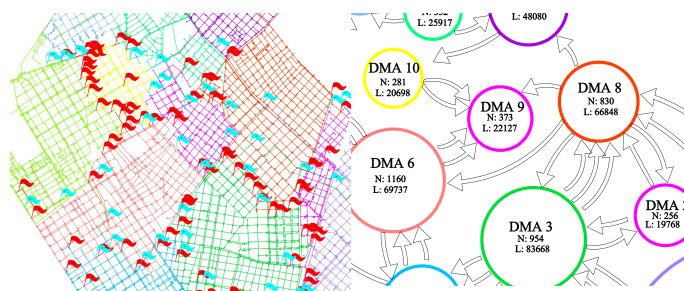


FIGURA A.9: Análisis de interacción de la DMA 9

En la Tabla A.9 se observa que los flujos entrantes establecen una demanda total de $435,6 \text{ m}^3/h$.

TABLA A.9: Condiciones de operación de la DMA 9

Condiciones	ID Tubo	Diámetro (mm)	Flujo (m ³ /h)	DMA conectado
Entradas	147839	200	219,0	DMA 8
	161241	90	27,9	DMA 10
	146563	81,4	14,0	DMA 6
	155923	226,2	86,1	DMA 6
	156795	175	88,6	DMA 10

A.0.10. DMA 10

La DMA 10 recibe abastecimiento de la DMA 7 y suministra agua a la DMA 9. La entrada se realiza por una única tubería, mientras que la salida se divide por dos tuberías de menor diámetro.

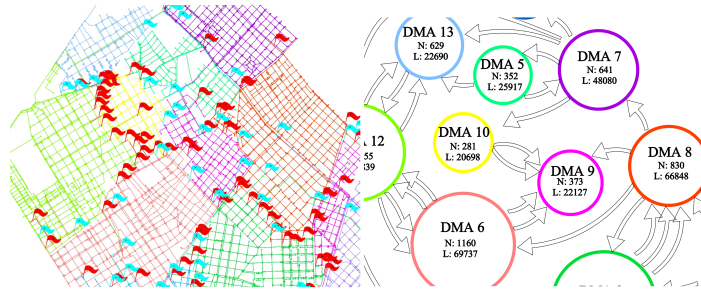


FIGURA A.10: Análisis de interacción de la DMA 10

TABLA A.10: Condiciones de operación de la DMA 10

Condiciones	ID Tubo	Diámetro (mm)	Flujo (m ³ /h)	DMA conectado
Entradas	158400	500	724,2	DMA 7
Salidas	156795	175	88,6	DMA 9
	161241	90	27,9	DMA 9

El balance de agua realizado con los datos de la Tabla A.11 establece una demanda neta de 607,6 m³/h.

A.0.11. DMA 11

La DMA 11 posee una única conexión con la DMA 7, este tubo proporciona todo el caudal consumido dentro del área.

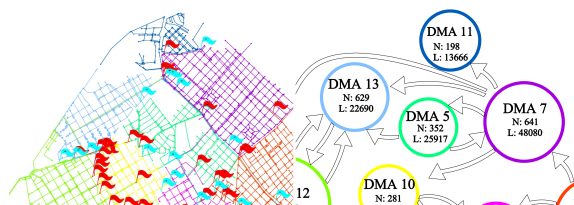


FIGURA A.11: Análisis de interacción de la DMA 11

TABLA A.11: Condiciones de operación de la DMA 11

Condiciones	ID Tubo	Diámetro (mm)	Flujo (m^3/h)	DMA conectado
Entradas	161513	250	152,6	DMA 7

La demanda total de la DMA 11 es de $152,6 m^3/h$.

A.0.12. DMA 12

La DMA 12 posee un total de nueve caudalímetros que establecen las conexiones con cuatro DMAs. Esta DMA se conecta con otras 4 DMAs. Con las DMAs 4 y 7 posee una conexión con cada una, de las cuales recibe agua. Además con las DMAs 6 y 13 posee múltiples conexiones de entrada y salida de caudales.

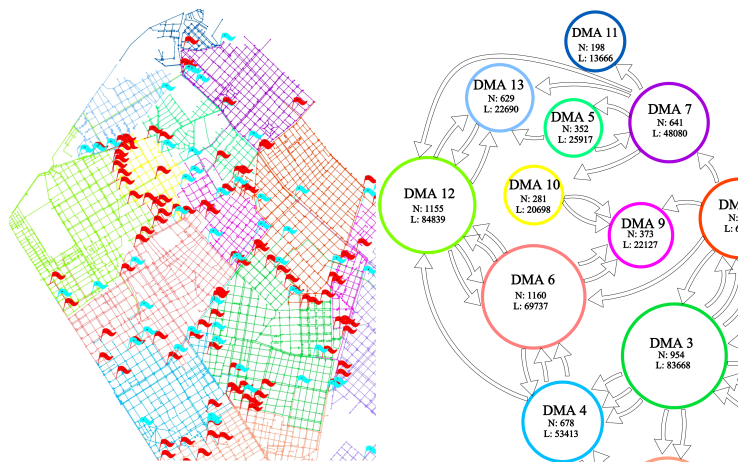


FIGURA A.12: Análisis de interacción de la DMA 12

En base a la información de la Tabla A.12 se puede calcular que la demanda servida total de esta área es de $572,0 m^3/h$.

TABLA A.12: Condiciones de operación de la DMA 12

Condiciones	ID Tubo	Diámetro (mm)	Flujo (m^3/h)	DMA conectado
Entradas	154484	144,6	27,2	DMA 6
	160744	400	531,6	DMA 7
	162645	450	462,1	DMA 4
	152381	180,8	40,2	DMA 6
	158229	321,2	93,0	DMA 13
Salidas	151340	300	71,0	DMA 6
	160835	355	202,2	DMA 13
	162649	200	237,9	DMA 6
	159246	160	71,0	DMA 13

A.0.13. DMA 13

La DMA 13 posee cinco caudalímetros, se conecta con tres DMAs vecinas. Cuatro de estas conexiones corresponden con flujos de entrada procedentes de las DMAS 5, 7 y 12. El único caudal de salida que registra la DMA es un abastecimiento a la DMA 12. Es notable que de las 5 conexiones que posee la DMA 13, 3 corresponden con la DMA 12.

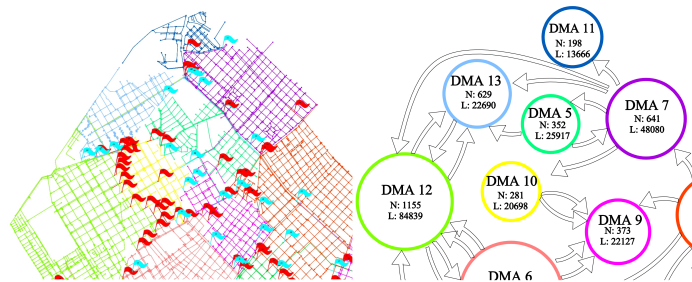


FIGURA A.13: Análisis de interacción de la DMA 13

TABLA A.13: Condiciones de operación de la DMA 13

Condiciones	ID Tubo	Diámetro (mm)	Flujo (m^3/h)	DMA conectado
Entradas	158994	225	16,0	DMA 5
	159246	160	71,0	DMA 12
	160742	600	128,6	DMA 7
	160835	355	202,2	DMA 12
Salidas	158229	321,2	93,0	DMA 12

El balance de agua realizado con los flujos de entrada y salida de la Tabla A.13 establecen una demanda total servida de $324,8 m^3/h$.

Bibliografía

- Alvisi, S. and Franchini, M. (2013). A heuristic procedure for the automatic creation of district metered areas in water distribution system. Urban Water Journal, 23:–.
- Arenas, A., Duch, J., Fernández, A., and Gómez, S. (2007). Size reduction of complex networks preserving modularity. New Journal of Physics, 9(6):176.
- Bahrami, S. and Imari, A. (2014). Optimal placement of distributed generation units for constructing virtual power plant using binary particle swarm optimization algorithm. Journal of Electrical & Electronic Systems, 3:127.
- Baker, M. (2009). The baker report: Municipal water distribution system security study—recommendations for science and technology investments. US Dept. of Homeland Security, Washington, DC.
- Bianchotti, J. D., Bonetti, C. A., and Puccini, G. D. (2019). Segmentación óptima de redes de agua basada en la confiabilidad. Mecánica Computacional, 37(47):1823–1832.
- Bianchotti, J. D., Denardi, M., Castro-Gama, M., and Puccini, G. D. (2021a). Comparación de indicadores para el diseño óptimo de distritos de redes de distribución de agua potable. Mecánica Computacional, 38(37):1397–1406.
- Bianchotti, J. D., Denardi, M., Castro-Gama, M., and Puccini, G. D. (2021b). Sectorization for water distribution systems with multiple sources: A performance indices comparison. Water, 13(2).
- Bianchotti, J. D., Ercole, P., and Puccini, G. D. (2018). Detección de comunidades en redes de distribución de agua potable. Mecánica Computacional, 36(45):2059–2067.

- Bianchotti, J. D., Puccini, G. D., and Chiotti, O. (2020). Resiliencia de redes de agua sectorizadas. AJEA, (5).
- Blondel, V. D., Guillaume, J., Lambiotte, R., and Lefebvre, E. (2008). Fast unfolding of communities in large networks. J. Stat. Mech.: Theor. Exper., 10:P10008.
- Blum, C. and Roli, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. ACM computing surveys (CSUR), 35(3):268–308.
- Bonetti, C., Bianchotti, J., Vega, J., and Puccini, G. (2021). Optimal segmentation of electrical distribution networks. IEEE Latin America Transactions, 19(8):1375–1382.
- Botella Langa, A., Choi, Y.-G., Kim, K.-S., and Jang, D.-W. (2022). Application of the harmony search algorithm for optimization of wdn and assessment of pipe deterioration. Applied Sciences, 12(7).
- Brentan, B. M., Carpitella, S., Izquierdo, J., Luvizotto Jr, E., and Meirelles, G. (2022). District metered area design through multicriteria and multiobjective optimization. Mathematical methods in the applied sciences, 45(6):3254–3271.
- Butler, D. (2000). Leakage detection and management. UK: Palmer Environmental Ltd.
- Campbell, E., Ayala-Cabrera, D., Izquierdo, J., Perez-García, R., and Tavera, M. (2014). Waler supply network sectorization based on social networks community detection algorithms. Procedia Engineering, 89:1208–1215.
- Cassiolato, G., Carvalho, E. P., Caballero, J. A., and Ravagnani, M. A. S. S. (2021). Optimization of water distribution networks using a deterministic approach. Engineering Optimization, 53(1):107–124.
- Castro-Gama, M., Lanfranchi, E., Pan, Q., and Jonoski, A. (2015a). Water distribution network model building, case study: Milano, italy. Procedia Engineering. Proceedings of the 13th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI2015., 119:573–582.
- Castro-Gama, M., Pan, Q., Jonoski, A., and Chiesa, C. (2015b). Model-based sectorization of water distribution networks for increased energy efficiency. Proceedings of the HIC2014., Paper 233.

- Castro-Gama, M., Pan, Q., Jonoski, A., and Solomatine, D. (2016). A graph theoretical sectorization approach for energy reduction in water distribution networks. Procedia Engineering, 154:19–26. 12th International Conference on Hydroinformatics (HIC 2016) - Smart Water for the Future.
- Castro-Gama, M., Popescu, I., Jonoski, A., and Pan, Q. (2015c). Towards increased water and energy efficiencies in water distribution systems. Environmental Engineering and Management Journal., 14(6):1271–1278.
- Charalambous, B. (2005). Experiences in dma redesign at the water board of lemosos, cyprus.
- Chatzivasili, S., Papadimitriou, K., and Kanakoudis, V. (2019). Optimizing the formation of dmas in a water distribution network through advanced modelling. Water, 11(2):278.
- Chelli, F. M. (2023). 2023 annual report. the state of the nation.
- Clauset, A., Newman, M. E., and Moore, C. (2004). Finding community structure in very large networks. Physical review E, 70(6):066111.
- Cross, H. (1936). Analysis of flow in networks of conduits or conductors. University of Illinois. Engineering Experiment Station. Bulletin; no. 286.
- Denardi, M., Bianchotti, J. D., Castro-Gama, M., and Puccini, G. D. (2024a). Managing nighttime pressures for background leakages control in water distribution networks using simulated annealing. Enviado.
- Denardi, M., Bianchotti, J. D., Puccini, G. D., and Castro-Gama, M. (2024b). Optimizing performance of water distribution networks: Sectorization and pressure management for leakage reduction. Engineering Proceedings, 6.
- Department of the Environment, N. W. C. (1980). Leakage control policy and practice. Standing Technical Committee, reports Number 26(DWI0190).
- Di Nardo, A., Di Natale, M., Ciarmiello, M., et al. (2009). Graph theory as a tool for design of district-metered water supply networks. pages 1537–1544.

- Di Nardo, A., Di Natale, M., Santonastaso, G. F., Tzatchkov, V. G., and Alcocer-Yamanaka, V. H. (2014). Water network sectorization based on graph theory and energy performance indices. Journal of Water Resources Planning and Management, 140(5):620–629.
- Di-Nardo, A., Di-Natale, M., Santonastaso, G. F., and Venticinque, S. (2011). Graph partitioning for automatic sectorization of a water distribution system. Proceedings of computer and control in water industry CCWI, pages 841–846.
- Diao, K., Zhou, Y., and Rauch, W. (2013). Automated creation of district metered area boundaries in water distribution systems. Journal of Water Resources Planning and Management, 139(2):184–190.
- DiNardo, A., DiNatale, M., Santonastaso, G., Tzatchkov, V., and Yamanaka, V. (2014). Divide and conquer partitioning technoques for smart water networks. Procedia Engineering, 89:1176–1183.
- Elsner, U. (1997). Graph partitioning-a survey.
- Farley, M., Water, S., Supply, W., Council, S. C., Organization, W. H., et al. (2001). Leakage management and control: a best practice training manual.
- Farmani, R., Savic, D. A., and Walters, G. A. (2004). Exnet benchmark problem for multi-objective optimization of large water systems. Modelling and control for participatory planning and managing water systems.
- Ferrari, G., Savic, D., and Becciu, G. (2014). Graph-theoretic approach and sound engineering principles for design of district metered areas. Journal of Water Resources Planning and Management, 140(12):04014036.
- Fjällström, P.-O. (1998). Algorithms for graph partitioning: A survey, volume 3 of linköping electronic articles in computer and information science.
- Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia y Organización Mundial de la Salud (2023). Progresos en materia de agua para consumo, saneamiento e higiene en los hogares 2000-2022, el género en el punto de mira.

- Fortunato, S. (2010). Community detection in graphs. Physics Reports, 486(3):75–174.
- Gini, C. (1912). Variabilità e mutabilità: contributo allo studio delle distribuzioni e delle relazioni statistiche.[Fasc. I.]. Tipogr. di P. Cuppini.
- Giudicianni, C., Herrera, M., Di-Nardo, A., and Adeyeye, K. (2020). Automatic multiscale approach for water networks partitioning into dynamic district metered areas. Water Resources Management, 34(2):835–848.
- Giustolisi, O., Berardi, L., and Laucelli, D. (2014). Optimal water distribution network design accounting for valve shutdowns. Journal of Water Resources Planning and Management, 140:277–287.
- Giustolisi, O. and Ridolfi, L. (2014). New modularity-based approach to segmentation of water distribution networks. J. Hydraul., 140 (10) 04014049:1–14.
- Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. Computers & operations research, 13(5):533–549.
- Gomes, R., Marques, A., and Sousa, J. (2012). Identification of the optimal entry points at district metered areas and implementation of pressure management. Urban Water Journal, 9(6):365–384.
- Grisales, L. F., Montoya, O. D., Grajales, A., Hincapie, R. A., and Granada, M. (2018). Optimal planning and operation of distributed system considering distributed energy resources and automatic reclosers. IEEE Latin America Transactions., 16-1:146–154.
- Gupta, R. and Prasad, T. (2000). Extended use of linear graph theory for analysis of pipe networks. Journal of hydraulic engineering, 126(1):56–62.
- Hajebi, S., Roshani, E., Cardozo, N., Barrett, S., Clarke, A., and Clarke, S. (2015). Water distribution network sectorisation using graph theory and many-objective optimisation. Journal of Hydroinformatics, 18(1):77–95.
- Herrera, M., Izquierdo, J., Perez-García, R., and Ayala-Cabrera, D. (2010). Water Supply Clusters by Multi-Agent Based Approach, pages 861–869.

- Isaacs, L. T. and Mills, K. G. (1980). Linear theory methods for pipe network analysis. Journal of the hydraulics division, 106(7):1191–1201.
- Kadu, M. S., Gupta, R., and Bhave, P. R. (2008). Optimal design of water networks using a modified genetic algorithm with reduction in search space. Journal of Water Resources Planning and Management, 134(2):147–160.
- Kang, D. and Lansey, K. (2012). Revisiting optimal water-distribution system design: Issues and a heuristic hierarchical approach. Journal of Water Resources Planning and Management, 138(3):208–217.
- Khoa Bui, X., S. Marlim, M., and Kang, D. (2020). Water network partitioning into district metered areas: A state-of-the-art review. Water, 12(4):1002.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, J., and Vecchi, M. (1983). Optimization by simulated annealing. Science, 220:671–680.
- Lara, A., Gutiérrez, M. A., and Rincón, E. A. (2018). A simulated annealing-based multiobjective optimization algorithm for political districting. IEEE Latin America Transactions., 16-6:1723–1731.
- Liu, J. and Han, R. (2018). Spectral clustering and multicriteria decision for design of district metered areas. Journal of Water Resources Planning and Management, 144(5):04018013.
- Liu, J. and Lansey, K. E. (2020). Multiphase dma design methodology based on graph theory and many-objective optimization. Journal of water resources planning and management, 146(8):04020068.
- López, J. (2013). Optimización multiobjetivo: aplicaciones a problemas del mundo real. Buenos Aires, Argentina, Universidad Nacional de la Plata.
- MacDonald, G. and Yates, C. D. (2005). Dma design and implementation, a north american context.
- Martin, D. and Peters, G. (1963). The application of newton’s method to network analysis by digital computer. Journal of the institute of Water Engineers, 17(2):115–129.

- Martí, R. (2003). Procedimientos metaheurísticos en optimización combinatoria. Matemáticas, Universidad de Valencia, 1(1):3–62.
- Massoud, T. and Zia, A. (2003). Dynamic management of water distribution networks based on hydraulic performance analysis of the system. Water Science and Technology: Water Supply, 3(1-2):95–102.
- Meneses, C. A. P. and Echeverri, M. G. (2007). Optimización multiobjetivo usando un algoritmo genético y un operador elitista basado en un ordenamiento no-dominado (nsga-ii). Scientia et Technica, 1(35).
- Ministerio de Obras Públicas, Argentina (2021). Informe de coyuntura sobre acceso e igualdad al agua y al saneamiento.
- Morrison, J., Tooms, S., Rogers, D., et al. (2007). District metered areas guidance notes. Int. Water Assoc.(IWA), Water Loss Task Force.
- Newman, M. E. J. (2004). Analysis of weighted networks. Phys. Rev. E, 70:056131.
- Newman, M. E. J. and Girvan, M. (2004). Finding and evaluating community structure in networks. Phys. Rev. E, 69:026113.
- Ochoa Alejo, L. (2014). Sectorización en redes de agua potable (primera). Asociación Mexicana de Empresas de Agua y Saneamiento de México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Organización de las Naciones Unidas (2015). Transformar nuestro mundo: la agenda 2030 para el desarrollo sostenible. www.ar.undp.org, pages 1–24.
- Organización de las Naciones Unidas (2019). The sustainable development goals report 2019.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2023). <https://www.fao.org/newsroom/detail/water-scarcity-means-less-water-for-agriculture-production-which-in-turn-means-less-food-available-threatening-food-security-and-nutrition/es>. Accedido el 03 de 2024.

- Organización Mundial de las Salud (2020). Global progress report on wash in health care facilities fundamentals first.
- Ostfeld, A. (2012). Battle of water calibration networks. Journal of Water Resour. Plann. Manage., 138:523–532.
- Perelman, L. and Ostfeld, A. (2011). Topological clustering for water distribution systems analysis. Environmental Modelling and Software, 26(7):969–972.
- Porter, M. A., Onnela, J., and Mucha, P. J. (2009). Communities in networks. Notices of the AMS., 56:1082–1097.
- Puccini, G. D., Blaser, L., Bonetti, C. A., and Butarelli, A. (2016). Robustness-based design of water distribution networks. Water Utility Journal, (13-28).
- Rahmani, F., Muhammed, K., Behzadian, K., and Farmani, R. (2018). Optimal operation of water distribution systems using a graph theory-based configuration of district metered areas. Journal of Water Resources Planning and Management, 144(8):04018042.
- Ramos, A., Sánchez, P., Ferrer, J. M., Barquín, J., and Linares, P. (2010). Modelos matemáticos de optimización. Publicación Técnica, 1.
- Rao, S. S. (2019). Engineering optimization: theory and practice. John Wiley & Sons.
- Reddy, L. S. and Elango, K. (1989). Analysis of water distribution networks with head-dependent outlets. Civil Engineering Systems, 6(3):102–110.
- Reichardt, J. and Bornholdt, S. (2004). Detecting fuzzy community structures in complex networks with a potts model. Phys. Rev. Lett., 93 (21):218701(4).
- Reichardt, J. and Bornholdt, S. (2006). Statistical mechanics of community detection. Physical review E, 74(1):016110.
- Rogers, D. (2005). Reducing leakage in jakarta, indonesia.
- Ruiz Espejo, M. (2014). Fundamentos de la inferencia estadística objetiva.

- Ruiz Espejo, M. (2017). Estimación de la desviación estándar. Estadística española, 59(192):37–44.
- Saldarriaga, J., Bohorquez, J., Celeita, D., Vega, L., Paez, D., Savic, D., Dandy, G., Filion, Y., Grayman, W., and Kapelan, Z. (2019). Battle of the water networks district metered areas. Journal of Water Resources Planning and Management, 145(4):04019002.
- Scarpa, F., Lobba, A., and Becciu, G. (2016). Elementary dma design of looped water distribution networks with multiple sources. Journal of Water Resources Planning and Management, 142(6):04016011.
- Schneider, J. J. and Kirkpatrick, S. (2006). Stochastic Optimization. Springer Science & Business Media.
- Scibetta, M., Boano, F., Revelli, R., and Ridolfi, L. (2014). Community detection as a tool for district metered areas identification. Procedia Engineering, 70:1518–1523.
- Shamir, U. and Howard, C. D. D. (1968). Water distribution systems analysis. Journal of Hydraulic Engineering, 94:219–234.
- Sharma, A. N., Dongre, S. R., Gupta, R., and Ormsbee, L. (2022). Multiphase procedure for identifying district metered areas in water distribution networks using community detection, nsga-iii optimization, and multiple attribute decision making. Journal of Water Resources Planning and Management, 148(8):04022040.
- Sharma, C. and Bedi, P. (2017). Ccfrs–community based collaborative filtering recommender system. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 32(4):2987–2995.
- Swamee, P. K. and Sharma, A. K. (1990). Decomposition of large water distribution systems. Journal of Environmental Engineering, 116(2):269–283.
- Tabesh, M. and Saber, H. (2012). A prioritization model for rehabilitation of water distribution networks using gis. Water resources management, 26:225–241.
- Todini, E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. Urban Water, 2:115–122.

- Todini, E. and Pilati, S. (1988). A gradient algorithm for the analysis of pipe networks. Computer Application in Water Supply, System Analysis and Simulation. John Wiley, London, vol. I:1–20.
- Tooryan, F., Moghaddas, S. M., Bathaee, S., and Hamidhassanzadeh-Fard, H. (2013). Distributed energy resources optimal sizing and placement in a microgrid. International Electrical Engineering Journal, 4:1059–1070.
- Tzatchkov, V. G., Alcocer-Yamanaka, V. H., and Bourguett Ortíz, V. (2006). Graph theory based algorithms for water distribution network sectorization projects. pages 1–15.
- Van Veldhuizen, D. A. (1999). Multiobjective evolutionary algorithms: classifications, analyses, and new innovations. Technical report, Air Force Inst of Tech Wright-Pattersonafb Oh School of Engineering.
- Vasilic, Z., Stanic, M., Kapelan, Z., Prodanovic, D., and Babic, B. (2020). Uniformity and heuristics-based dense method for sectorization of water distribution networks. Journal of Water Resources Planning and Management, 146(3):04019079.
- Vegas Niño, Ó. T. (2012). Herramientas de ayuda a la sectorización de redes de abastecimiento de agua basadas en la teoría de grafos aplicando distintos criterios.
- Von Lücken, C., Hermosilla, A., and Barán, B. (2004). Algoritmos evolutivos para optimización multiobjetivo: Un estudio comparativo en un ambiente paralelo asíncrono. In X Congreso Argentino de Ciencias de la Computación.
- Wagner, J., Shamir, U., and Marks, D. (1988). Water distributions system reliability: simulation methods. Journal of Water Resources Planning and Management, 114:276–294.
- Waltman, L. and van Eck, N. J. (2013). A smart local moving algorithm for large-scale modularity-based community detection. European Physical Journal B, 86.
- Wasserman, S. and Faust, K. (1994). Social network analysis: Methods and applications.

- White, S. and Smyth, P. (2005). A spectral clustering approach to finding communities in graphs. In Proceedings of the 2005 SIAM international conference on data mining, pages 274–285. SIAM.
- Wood, D. J. and Charles, C. O. (1972). Hydraulic network analysis using linear theory. Journal of the Hydraulics division, 98(7):1157–1170.
- Wood, D. J. and Rayes, A. (1981). Reliability of algorithms for pipe network analysis. Journal of the Hydraulics Division, 107(10):1145–1161.
- World Vision International (2023). Clean water, sanitation and hygiene for every child. Accedido el 03 de 2024.
- Xu, X., Yuruk, N., Feng, Z., and Schweiger, T. A. (2007). Scan: a structural clustering algorithm for networks. pages 824–833.
- Yang, X. (2010). Engineering optimization: an introduction with metaheuristic applications. John Wiley & Sons.
- Zhang, K., Yan, H., Zeng, H., Xin, K., and Tao, T. (2019). A practical multi-objective optimization sectorization method for water distribution network. Science of The Total Environment, 656:1401–1412.
- Zhang, Q., Wu, Z. Y., Zhao, M., and Qi., J. (2017). Automatic partitioning of water distribution networks using multiscale community detection and multiobjective optimization. J. Water Resour. Plann. Manage., 149(9):04017057.
- Zheng, F., Simpson, A. R., and Zecchin, A. (2013). A decomposition and multistage optimization approach applied to the optimization of water distribution systems with multiple supply sources. Water Resources Research, 49(1):380–399.
- Zitzler, E., Deb, K., and Thiele, L. (2000). Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results. Evolutionary computation, 8(2):173–195.