

Sectorización de Redes de Distribución de Agua Potable

Paula Mariel López Huertas

Director

Carlos Alexis Bonilla Granados

Ingeniero Civil, Magister en Tecnologías para el Manejo de Aguas y Residuos

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Ambiental, Civil y Química

Programa Ingeniería Civil

Pamplona

2024

Sectorización de Redes de Distribución de Agua Potable

Paula Mariel López Huertas

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

Carlos Alexis Bonilla Granados

Ingeniero Civil, Magister en Tecnologías para el Manejo de Aguas y Residuos

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Ambiental, Civil y Química

Programa Ingeniería Civil

Pamplona

2024

Dedicatoria

Dedico este trabajo a quienes han sido mi inspiración y apoyo incondicional en este viaje académico:

A mi amado hijo, Dante Emiliano, cuya presencia ha transformado mi vida de manera profunda y significativa.

A mi compañero de vida, David Fernando por su amor, sacrificio y constante aliento.

Gracias por hacer parte de mi historia y creer en mí en cada paso del camino.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que han contribuido de alguna manera a la realización de este trabajo.

Agradezco a mi tutor Ing. Carlos Bonilla por su orientación, paciencia y apoyo a lo largo de este proceso. Su experiencia y consejos han sido fundamentales para el desarrollo de este proyecto.

A mi familia y amigos, por su comprensión y apoyo incondicional durante este tiempo. Sus palabras de aliento y su paciencia me han dado la fuerza para seguir adelante.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de alguna manera, contribuyeron con sus conocimientos y experiencias, haciendo posible la culminación de este trabajo

Tabla de Contenido

GLOSARIO	11
INTRODUCCIÓN	17
CAPITULO I. GENERALIDADES	18
1.1. Historia de los acueductos	18
1.2. Definición e importancia	27
1.3. Partes de un acueducto	28
1.3.1. Fuentes de agua y captación	30
1.3.2. Aducción	33
1.3.3. Plantas de tratamiento de agua potable PTAP	34
1.3.4. Almacenamiento	35
1.3.5. Conducción	36
1.3.6. Redes de distribución de agua potable.....	36
CAPITULO II. REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE	39
2.1 Importancia de las redes de distribución	39
2.2 Funcionamiento de las redes de distribución	40
2.2.1 Red matriz	41
2.2.2 Redes menores	42
2.3 Parámetros importantes de las redes de distribución	43
2.3.1 Periodo de diseño	43
2.3.2 Profundidades para la instalación de tuberías	43

2.3.3	Presión.....	44
2.3.4	Velocidad	45
2.3.5	Caudal	45
2.3.6	Diámetros de tuberías	45
2.4.	Fugas en las redes de distribución de agua potable	46
CAPITULO III. SECTORIZACIÓN HIDRÁULICA DE REDES DE DISTRIBUCIÓN.....		47
3.1	Ventajas y limitaciones de la sectorización hidráulica.....	50
3.2	Criterios de sectorización hidráulica	52
3.2.1	Sectorización por límites naturales	53
3.2.2	Sectorización por pérdidas de energía	56
3.2.3	Sectorización por caudal	59
3.2.4	Sectorización por presión.....	61
3.2.5	Sectorización por potencia.....	64
3.3	Criterios de sectorización para la creación de áreas de medición por distritos (DMA)	66
3.4	Metodologías de sectorización basadas en algoritmos.....	68
3.4.1	Teoría de grafos	69
3.4.2	Estructuras comunitarias	74
3.4.3	Procesos heurísticos	78
3.5	Ejemplos de sectorización basados en algoritmos	80
3.5.1	Herramienta de ayuda a la sectorización de redes de abastecimiento de agua basadas en la teoría de grafos aplicando diferentes criterios.	80

3.5.2 Método de sectorización basada en la detección de comunidades mediante caminos aleatorios.....	89
CAPITULO IV. INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y REDES NEURONALES.....	99
4.1 Redes neuronales.....	100
4.1.1 Historia de las redes neuronales.....	100
4.1.2 Clasificación de las redes neuronales artificiales.....	104
4.1.3 Aplicación de las redes neuronales a la sectorización de agua potable	106
4.2 Ejemplos de aplicación de redes neuronales a la sectorización de agua potable	107
4.2.1 Cálculo hidráulico de redes de distribución de agua potable utilizando redes neuronales	107
4.2.2 Red neuronal de grafos para la partición integrada de la red de agua y las áreas de medición dinámica del distrito	110
CONCLUSIONES	114
REFERENCIAS.....	117

Lista de Tablas

Tabla 1. Caudales de diseño hidráulico de cada uno de los componentes de sistemas de acueducto.	45
Tabla 2. Características de la red de distribución de agua.	83
Tabla 3. Presiones en los nodos de la red de estudio.	88
Tabla 4. Caudales y presiones de las tuberías.....	88

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema túnel de Samos.	20
Figura 2. Acueducto de Segovia.	22
Figura 3. Vista aérea de acueducto de Nazca.	24
Figura 4. Esquema de sección de acueducto.	24
Figura 5. Acueducto de Morelia.	25
Figura 6. Canales de Acueducto de Santa Fe de Bogotá.	26
Figura 7. Partes de un acueducto.	29
Figura 8. Infraestructura del acueducto	30
Figura 9. Bocatoma.	32
Figura 10. Línea de aducción de acueducto.	33
Figura 11. Planta de tratamiento de agua potable (PTAP).	34
Figura 12. Tanque de almacenamiento.	35
Figura 13. Vista en planta de una red de distribución de agua potable.	38
Figura 14. Red matriz de acueducto de Bogotá.	41
Figura 15. Redes menores del acueducto de Bogotá.	42
Figura 16. Sectorización Hidráulica de una Red de Distribución de Agua Potable.	49
Figura 17. Sectorización de la RDAP de Matamoros.	55
Figura 18. Sectorización de RDAP de Barcelona, España.	56
Figura 19. Criterios para la creación de áreas de medición por distrito (DMA).	67
Figura 20. Multígrafo.	70
Figura 21. Matriz de incidencia.	71
Figura 22. Matriz de adyacencia.	72

Figura 23. Red de abastecimiento dividida en grafos.	74
Figura 24. Estructuras comunitarias.	75
Figura 25. Fases previas a la creación de un DMA.	81
Figura 26. Esquema de la RDAP.	83
Figura 27. Red de distribución de agua.	84
Figura 28. Red matriz-arterial.....	85
Figura 29. Árbol dirigido.	85
Figura 30. Ramas de la RDAP.....	86
Figura 31. Áreas de distritos de medición.	87
Figura 32. Diámetros y cotas de la red utilizada como ejemplo.....	92
Figura 33. Número de sectores generados por el algoritmo Walktrap mediante distintos números.	93
Figura 34. Partición obtenida usando 200 iteraciones.	94
Figura 35. Partición obtenida usando 1500 iteraciones.	94
Figura 36. Sectores generados utilizando criterio de longitud de tubería (30-3Km).....	95
Figura 37. Sectores generados utilizando criterio de longitud de tubería (30-1.5Km).....	96
Figura 38. Sectores generados tras el criterio de cota de terreno.....	96
Figura 39. Sectores generados tras el criterio de cota de terreno restringido a 5m.	97
Figura 40. La inteligencia artificial como sistema informático.	99
Figura 41. Historia y avances importantes de las redes neuronales artificiales.....	103
Figura 42. Metodología de Implementación del modelo de RNA en Matlab.....	108
Figura 43. Predicción del comportamiento en el nudo 4.	109
Figura 44. La estructura de la red de distribución de agua C-Town.....	112

Glosario

Aprendizaje supervisado: Utiliza conjuntos de datos etiquetados para entrenar el modelo. El modelo ajusta sus parámetros mediante algoritmos como el backpropagation (propagación hacia atrás de los errores), minimizando la diferencia entre las predicciones del modelo y las salidas reales esperadas.

Bombas: se utilizan para impulsar el agua a través de la red, especialmente en áreas donde se requiere aumentar la presión para garantizar un suministro constante, incluso en áreas elevadas o distantes de la fuente de agua principal.

Calidad del agua: Se controla mediante el monitoreo constante de parámetros como pH, turbidez, cloro residual y contaminantes para garantizar que el agua entregada cumpla con los estándares de calidad establecidos.

Capa de entrada de una red neuronal: Recibe datos sin procesar o características del problema a resolver.

Capas ocultas de una red neuronal: Realizan transformaciones complejas de los datos mediante cálculos ponderados antes de pasar la información a la capa siguiente.

Capa de salida de una red neuronal: Produce la salida final del modelo, que puede ser una clasificación, una predicción numérica o una representación generada según la tarea específica.

Componentes principales de una red de distribución de agua: Los componentes principales de una RDAP son las tuberías, válvulas, bombas, tanques de almacenamiento y estaciones de bombeo.

Eficiencia operativa: Permite una gestión más efectiva del flujo de agua y la detección temprana de posibles problemas como fugas, ya que facilita la segmentación y el control de secciones específicas de la red.

Equilibrio de presión: Distribuye de manera más uniforme la presión del agua a lo largo de la red, minimizando las diferencias de presión entre diferentes partes del sistema y garantizando un suministro más constante y eficiente.

Estaciones de bombeo: Situadas estratégicamente a lo largo de la red para mover el agua a través de terrenos elevados o para superar obstáculos topográficos que afecten el flujo natural del agua.

Flexibilidad y adaptabilidad: El diseño en forma de malla facilita la expansión y la modificación de la red para ajustarse a cambios en la demanda, crecimiento urbano o condiciones operativas cambiantes.

Interconexión redundante: Las tuberías principales y secundarias están dispuestas de manera que forman una malla, permitiendo que el agua pueda fluir por varias rutas alternativas. Esto asegura una mayor fiabilidad y capacidad de recuperación ante fallos o mantenimientos.

Métodos de sectorización hidráulica: Se realiza utilizando válvulas de sectorización estratégicamente ubicadas. Estas válvulas pueden ser manuales o automáticas, y se configuran para cerrar o abrir según sea necesario para aislar áreas específicas de la red.

Monitoreo y mantenimiento: Se realiza para identificar y reparar fugas, mejorar la eficiencia del sistema y responder rápidamente a interrupciones del servicio.

Neurona: Recibe múltiples entradas, las procesa utilizando una función de activación y produce una salida que se envía a las neuronas de la capa siguiente.

Planificación y expansión: Se realiza para asegurar que la red pueda manejar el crecimiento de la población y los cambios en la demanda de agua, integrando nuevas tecnologías y prácticas para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad.

Presión y flujo: La RDAP está diseñada para mantener niveles adecuados de presión y flujo de agua, asegurando que los consumidores reciban agua a la presión correcta en todo momento.

Red de distribución de agua: Es un sistema complejo de infraestructura diseñado para transportar agua potable desde las plantas de tratamiento o fuentes de abastecimiento hasta los puntos de consumo.

Red matriz: Es un tipo específico de diseño de red que utiliza un patrón en forma de malla o cuadrícula para interconectar las tuberías principales y secundarias.

Sectorización hidráulica: Tiene como objetivo dividir una red de distribución de agua en sectores más pequeños permitiendo mejorar la eficiencia operativa y la gestión del sistema.

Sector: Se refiere a una subdivisión o segmento específico de la red hidráulica. Cada sector está delimitado por válvulas estratégicamente ubicadas que permiten controlar el flujo de agua hacia áreas particulares de la red.

Tipos de redes neuronales: Incluyen redes neuronales feedforward, recurrentes y convolucionales.

Tipos de válvulas de sectorización: Válvulas de compuerta, de mariposa, de bola y de control, seleccionadas según las necesidades específicas de la red y las condiciones operativas.

Tuberías: Son el elemento principal de la RDAP, están diseñadas para transportar volúmenes de agua a lo largo de diferentes distancias. Las tuberías pueden ser de diferentes materiales como hierro fundido, acero, PVC, cobre, etc.

Válvula de sectorización: Controla el flujo de agua en secciones específicas de la red.

Válvulas de cierre: Permiten aislar secciones de la red para mantenimiento o reparaciones.

Válvulas de control: Son las encargadas de regular el flujo según la demanda y la presión.

Velocidad de un fluido: Se refiere a la magnitud y dirección del movimiento del fluido en un punto específico de su trayectoria.

Resumen

Una red de distribución de agua potable (RDAP) es un sistema esencial y complejo encargado de transportar agua limpia desde las plantas de tratamiento hasta los puntos de consumo. Esta estructura garantiza el acceso a agua de alta calidad y de manera segura a sus usuarios. La sectorización de redes de distribución de agua potable es una estrategia de gestión que consiste en dividir la red en sectores más pequeños y fáciles de manejar, cada uno de estos sectores cuenta con controles y medidores independientes, lo que permite una monitorización y gestión más precisa de la RDAP.

La sectorización de redes de distribución de agua potable emerge como una estrategia fundamental en la gestión eficiente y sostenible de recursos hídricos urbanos, con el objetivo principal de optimizar el rendimiento hidráulico, reducir pérdidas de agua no contabilizadas y minimizar interrupciones del servicio. Este documento explora métodos avanzados como el uso de redes neuronales para implementar la sectorización y destaca los beneficios de una gestión eficiente de recursos hídricos urbanos. Además, se analizan casos de estudio tanto internacionales como nacionales para ilustrar prácticas efectivas en proyectos similares.

Abstract

A potable water distribution network (PWDN) is an essential and complex system responsible for transporting clean water from treatment plants to consumption points. This structure ensures that users have access to high-quality and safe water. Sectorization of potable water distribution networks is a management strategy that involves dividing the network into smaller, more manageable sectors, each equipped with independent controls and meters, allowing for more precise monitoring and management of the PWDN.

The sectorization of potable water distribution networks emerges as a fundamental strategy in the efficient and sustainable management of urban water resources, with the main objective of optimizing hydraulic performance, reducing unaccounted-for water losses, and minimizing service interruptions. This document explores advanced methods such as the use of neural networks to implement sectorization and highlights the benefits of efficient urban water resource management. Additionally, it analyzes both international and national case studies to illustrate effective practices in similar projects.

Introducción

A lo largo de la historia humana el agua ha sido un factor decisivo debido a que este recurso es esencial para la supervivencia, ya que se necesita agua para diferentes usos básicos como el consumo humano, la producción agrícola y la salud pública, pues, se ha demostrado que el acceso a agua potable es fundamental para prevenir enfermedades y promover el desarrollo socioeconómico e industrial de una población. Además, la gestión equitativa y sostenible del agua es fundamental para mantener la paz y la estabilidad social a nivel local, nacional e internacional.

La sectorización de redes de distribución de agua es una estrategia fundamental en la gestión eficiente y sostenible de los recursos hídricos urbanos. Este proceso consiste en dividir una red de distribución de agua potable (RDAP) en áreas más pequeñas o sectores hidráulicos, cuyo fin es mejorar el control operativo de la RDAP, detectar fugas o problemas presentes en la red de manera rápida permitiendo responder de manera eficaz ante emergencias. En el contexto actual de crecimiento urbano y cambio climático, la sectorización se vuelve necesaria para garantizar la disponibilidad continua de agua potable de calidad a todos los ciudadanos.

La sectorización de redes de distribución de agua potable tiene como objetivo principal optimizar el rendimiento hidráulico de la red, reduciendo pérdidas de agua no contabilizadas y minimizando los tiempos de interrupción del servicio.

En este documento, se explorarán métodos y tecnologías avanzadas como la aplicación de redes neuronales para la implementación de la sectorización, así como los beneficios económicos, ambientales y sociales que se derivan de una gestión eficiente de los recursos hídricos urbanos. Además, se analizarán casos de estudio y experiencias internacionales y nacionales relevantes para ilustrar las prácticas y métodos aprendidos en la implementación de proyectos similares.

Capítulo I. Generalidades

1.1. Historia de los acueductos

El agua es uno de los recursos esenciales para la vida y el desarrollo de la humanidad, la presencia de este elemento ha sido condicionante para la construcción de ciudades, desde la creación de asentamientos en las riberas de los ríos. Es así como en la antigüedad, en el año 4000 a.C., la falta de lluvias provocó que en la antigua Mesopotamia las poblaciones tuvieran que trasladarse hacia los ríos Tigris y Éufrates en búsqueda de agua, esta acción repercutió en la creación de los primeros pueblos y ciudades (Viollet, 2010).

Debido a esto, se desarrollaron sistemas rudimentarios de acueductos para transportar agua desde ríos y manantiales hasta sus poblaciones. Estos sistemas utilizaban canales excavados en la tierra, tuberías de madera y en algunos casos, incluso sifonaje, fenómeno en el que el agua se desplaza de un lugar a otro a través de un tubo, debido a la diferencia de presión entre los dos extremos del tubo (Smith, 2005).

En el antiguo Egipto, los acueductos se utilizaban principalmente para el riego, pero también se construyeron algunos para abastecer de agua a las ciudades, como el acueducto de Fayum. Estos acueductos fueron esenciales para el sofisticado sistema de gestión hídrica en esta región de Egipto. El fértil oasis de Fayum debe gran parte de su riqueza hídrica a una compleja red de canales y acueductos construidos desde la antigüedad. Estos acueductos, junto con el conocido canal Bahr Yussef, fueron cruciales al redirigir el agua del Nilo hacia Fayum, transformando una zona originalmente desértica en un próspero centro agrícola. El canal Bahr Yussef, en particular, fue fundamental para la irrigación y la sostenibilidad agrícola, permitiendo la creación de extensos campos de cultivo alrededor del lago Moeris, actualmente conocido como Birket Qarun (Wendrich et al., 2016).

El diseño y la construcción de estos acueductos y canales reflejan un avanzado conocimiento de ingeniería hidráulica por parte de los antiguos egipcios. Estos sistemas no solo facilitaban el riego de los campos, sino que también regulaban el flujo de agua para prevenir inundaciones y asegurar un suministro constante, adaptándose a las variaciones estacionales del Nilo. La infraestructura hidráulica de Fayum no solo tuvo un impacto agrícola, sino también social y económico, contribuyendo al desarrollo de asentamientos y a la prosperidad de la región a lo largo de diversas épocas históricas, desde el Imperio Medio hasta la época grecorromana y más allá (Wendrich et al., 2016).

En resumen, los acueductos y sistemas de canales de Fayum son un testimonio de la capacidad de los antiguos egipcios para transformar su entorno y gestionar recursos naturales de manera eficiente, asegurando la viabilidad y riqueza de esta región a lo largo de los milenios (Wendrich et al., 2016).

En la antigua Grecia, los acueductos se caracterizaban por su construcción con tuberías de arcilla o piedra. Un ejemplo notable es el acueducto de Eupalinos en Samos, considerado una maravilla de la ingeniería griega (Lewis, 2001).

Este acueducto media aproximadamente 1.036 metros de longitud y fue excavado en la roca caliza del monte Kastro. Una característica notable de esta construcción es que fue iniciada simultáneamente desde ambos extremos del túnel y los dos equipos de trabajo se encontraron con una precisión sorprendente en el centro. Este método de construcción, conocido como excavación bidireccional, muestra el avanzado conocimiento de geometría y topografía de los antiguos ingenieros griegos (Kienast, 1995).

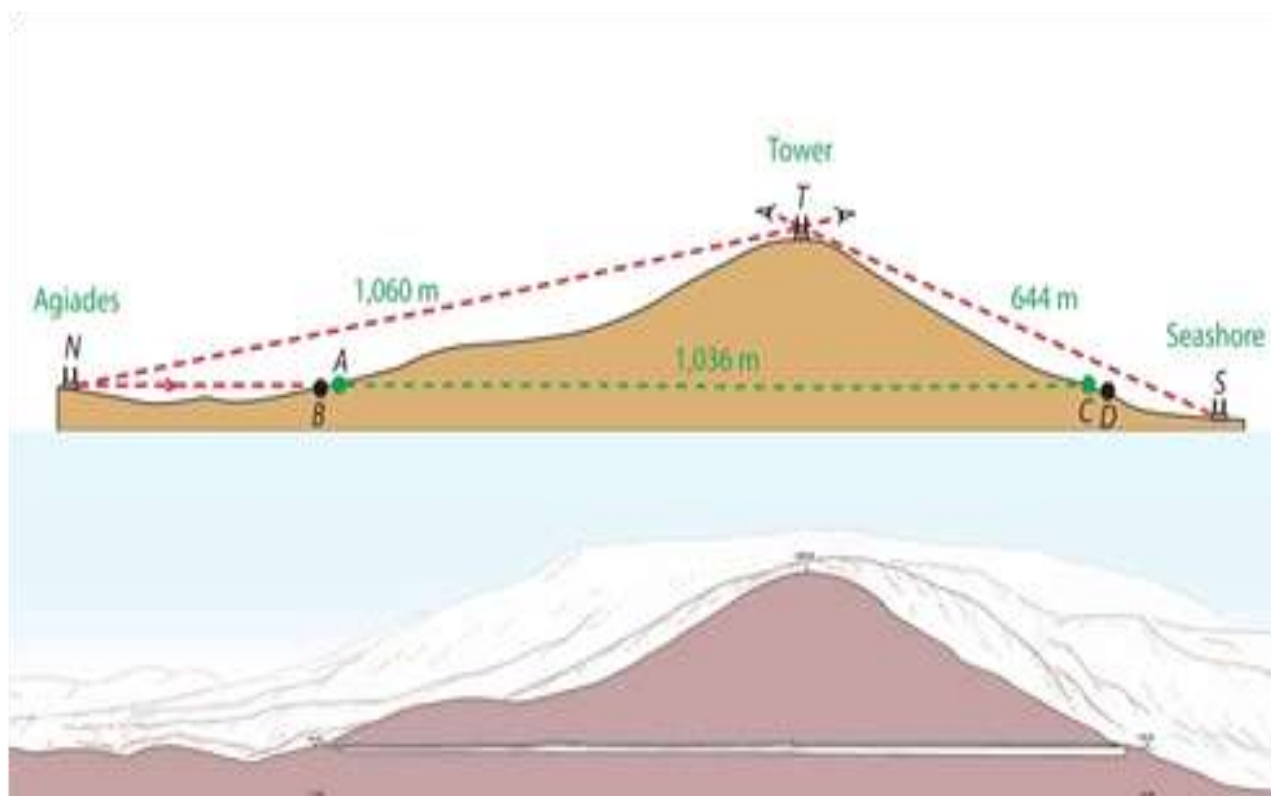
El túnel tenía un perfil trapezoidal y se encontraba a una profundidad de entre 50 y 100 metros. El propósito del acueducto era transportar agua desde la fuente de Agiades hasta la antigua ciudad

de Samos. El sistema incluía un canal de agua de cerámica que corría a lo largo del túnel, asegurando un suministro constante de agua a la ciudad (Crouch, 1993).

El acueducto de Eupalinos es considerado una de las mayores hazañas de la ingeniería en el mundo antiguo. Su diseño y construcción no solo fueron vitales para el suministro de agua de Samos, sino que también reflejan el alto nivel de conocimientos técnicos alcanzados por los ingenieros griegos de la época (Hodge, 1992).

Figura 1.

Esquema túnel de Samos.



Nota. La figura muestra el esquema de perfil del túnel rudimentario de Samos. Fuente: (Apostol, 2004).

En el año 100, la ciudad de Roma estaba dividida en catorce sectores y se distribuía el agua de las fuentes entre los distintos sectores de la ciudad, con el fin de garantizar que cada sector recibiera agua de al menos dos puntos de distribución con el fin de prevenir la escasez en épocas de sequía y pocas lluvias (Frontinus, 1961). Es allí donde se encuentran los primeros vestigios de la sectorización de redes de distribución de acueductos.

Una de las obras más representativas y conocidas de los acueductos romanos es el Acueducto de Segovia; famoso por sus dos niveles en arcos que atraviesan la ciudad, este acueducto aún conserva gran parte de su estructura original y sigue en funcionamiento. Construido durante el siglo I d.C., se extiende por aproximadamente 17 kilómetros y transportaba agua desde la Sierra de Guadarrama hasta la ciudad de Segovia. Este acueducto es conocido por su estructura de piedra caliza sin argamasa, compuesta por más de 20,000 bloques unidos mediante ensamblajes de gran precisión (Ortega, 2001).

El acueducto consta de dos niveles de arquerías: en su base, 118 arcos forman la arcada inferior, mientras que la superior está compuesta por 167 arcos más pequeños. Este diseño no solo cumplía con su función de transportar agua, sino que también servía como impresionante estructura de soporte que destacaba la capacidad técnica y estética de los ingenieros romanos (Caballero, 2010).

La precisión geométrica y la habilidad para mantener la pendiente necesaria para el flujo de agua son aspectos notables del diseño del acueducto. Los romanos utilizaron una técnica conocida como *opus quadratum*, que permitía la construcción de estructuras duraderas y estéticamente impresionantes sin necesidad de mortero (Fernández, 2004).

Figura 2.

Acueducto de Segovia



Nota: En la figura se visualizan los dos niveles de arcos del acueducto de Segovia.

Fuente: (Pané, 2016).

Los acueductos han jugado un papel crucial en el desarrollo de las civilizaciones en Latinoamérica desde tiempos precolombinos hasta la actualidad. Su historia está marcada por la innovación, la adaptación a diversos entornos y la importancia para el bienestar de las comunidades. Las civilizaciones mesoamericanas, como los mayas, aztecas e incas, destacaron por su ingenio en la construcción de acueductos. Utilizaban técnicas como la captación de agua de lluvia, canales subterráneos y sistemas de gravedad para transportar el agua desde sus fuentes a los centros urbanos y áreas agrícolas. Los acueductos mayas se caracterizaban por su extensa red de canales subterráneos que podían alcanzar varios kilómetros de longitud. Un ejemplo notable es el acueducto de Tikal, en Guatemala, que abastecía a la ciudad de agua potable y para riego. Los aztecas construyeron un acueducto de dos canales de madera que transportaba agua desde

Chapultepec hasta Tenochtitlán, recorriendo más de 15 kilómetros. Este sistema también incluía presas y diques para regular el flujo del agua (Aguirre, 2004).

Los acueductos de Nazca son un sistema hidráulico milenario que aún hoy funciona en las áridas tierras del sur de Perú. Construidos por la cultura Nasca entre los siglos II y VI d.C., estos ingeniosos canales subterráneos permitieron a sus creadores aprovechar las aguas subterráneas para irrigar sus campos y abastecer a sus poblaciones (Aldana, 2010).

El sistema se compone de una red de más de 40 acueductos, algunos de los cuales alcanzan hasta 30 kilómetros de longitud. Se construyeron pozos profundos en los lechos de los ríos secos, donde el agua se filtraba naturalmente a través de capas de arena y grava. Los canales subterráneos transportaban el agua filtrada hacia los campos de cultivo y centros poblados. La construcción de los acueductos no requirió de cemento u otro tipo de aglutinante, sino que se basó en la precisión del diseño y la colocación de las piedras. El objetivo principal de los acueductos de Nazca era transportar agua desde las zonas altas y húmedas hacia las zonas áridas y bajas donde se ubicaban sus comunidades. Esto les permitió desarrollar una próspera agricultura en un entorno desértico, cultivando diversos productos como maíz, frijoles, papas y algodón (UNESCO, 2007)

Los acueductos de Nazca son considerados una obra maestra de la ingeniería precolombina, su construcción demuestra el ingenio y la capacidad de adaptación de la cultura Nasca para sobrevivir en un ambiente hostil. Además, su funcionamiento continuo durante miles de años es un testimonio de la eficacia y sostenibilidad de este sistema hidráulico. Actualmente, 29 de los 42 acueductos originales aún se encuentran operativos. Estos siguen siendo utilizados por las comunidades locales para irrigar sus campos y abastecerse de agua. La UNESCO ha reconocido la importancia de los acueductos de Nazca al incluirlos en su Lista Indicativa de Patrimonio Mundial (UNESCO, 2007).

Figura 3.

Vista aérea de acueducto de Nazca

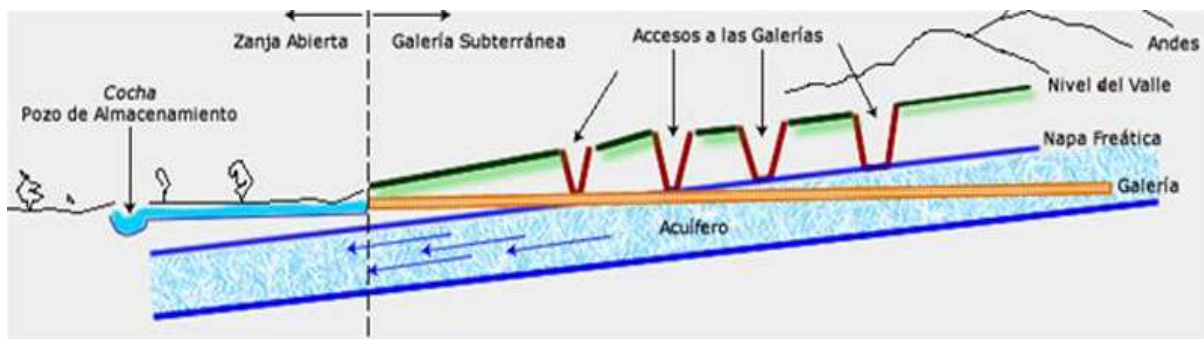


Nota. La figura muestra la vista aérea de los pozos de uno de los 40 acueductos de Nazca

Fuente: (Acueductos de Nazca, 2020).

Figura 4.

Esquema de sección de acueducto



Nota. La figura muestra el seccionamiento de los acueductos de Nazca Fuente: Acueductos de

Nazca: (Acueductos de Nazca, 2020).

Con la llegada de los españoles, se introdujeron nuevas técnicas de construcción y se ampliaron los sistemas de acueductos existentes. Se utilizaron materiales como la piedra, ladrillo y cal para construir estructuras más duraderas y resistentes. Se destacan el acueducto de Morelia, construido en el siglo XVIII y el acueducto de Querétaro, considerado una de las obras hidráulicas más importantes de la época colonial (Autoridad Nacional del Agua. (s.f.). , 2011)

Figura 5.

Acueducto de Morelia



Nota. La figura muestra el acueducto de Morelia, destacado por su arquitectura colonial.

Fuente: (Vieyra, 2020).

A su vez, el Acueducto de Santa Fe de Bogotá es una de las obras de ingeniería hidráulica más importantes de la época colonial en América Latina. Construido a finales del siglo XVI y principios del XVII, este acueducto fue crucial para abastecer de agua a la creciente población de la ciudad de Santafé de Bogotá, actual Bogotá, Colombia. Su construcción fue una respuesta a la necesidad de gestionar el suministro de agua en una ciudad en expansión (Forero, 2001).

Uno de los aspectos más destacados del Acueducto de Santa Fe de Bogotá es su arquitectura de piedra y ladrillo, que incluye varios puentes y pasos elevados para superar terrenos irregulares y cruzar barrancas. Estas estructuras no solo cumplían una función práctica, sino que también se convirtieron en elementos emblemáticos del paisaje urbano colonial (Montaña, 1998). Durante los siglos siguientes a su construcción, el acueducto fue objeto de varias modificaciones y ampliaciones para mejorar su eficiencia y capacidad de suministro de agua. Estas intervenciones fueron cruciales para adaptar el sistema a las necesidades cambiantes de una ciudad en constante crecimiento (Rodríguez, 2015).

Figura 6.

Canales de Acueducto de Santa Fe de Bogotá



Nota: La figura muestra los canales abiertos del acueducto de Santa Fe de Bogotá. Fuente: (Historia Acueducto, Agua y Alcantarillado de Bogotá , (s/f)).

La construcción y modernización de acueductos ha sido impulsada por el crecimiento urbano y la creciente demanda de agua potable. Gracias al uso de nuevos materiales y tecnologías, los acueductos han evolucionado hacia estructuras más complejas y eficientes. La historia y evolución de los acueductos y sus redes de distribución reflejan la continua necesidad de adaptar y optimizar la infraestructura para satisfacer las demandas de las crecientes poblaciones urbanas. Desde los acueductos romanos, que fueron maravillas de ingeniería diseñadas para llevar agua de fuentes distantes a las ciudades, hasta las complejas redes modernas, la gestión eficiente del agua ha sido crucial. Con el crecimiento acelerado de las ciudades contemporáneas, se hace imprescindible la sectorización hidráulica, una estrategia que permite dividir el sistema de distribución en sectores más manejables. Esto no solo mejora la detección y reparación de fugas, sino que también optimiza la presión y el suministro de agua, garantizando un uso más eficiente de los recursos hídricos y una mejor calidad del servicio para los ciudadanos.

1.2. Definición e importancia

Los acueductos siguen siendo vitales en la actualidad, cumpliendo un papel crucial al asegurar que comunidades tanto urbanas como rurales tengan acceso constante y seguro al agua potable. Estos sistemas son como arterias que llevan agua desde sus fuentes naturales hasta donde más se necesita, utilizando desde simples canales hasta complejas redes de tuberías (Hill, 2016).

Su importancia radica en garantizar que todos puedan contar con agua potable de manera confiable, lo cual es fundamental para la salud pública, la higiene y el desarrollo socioeconómico. No solo satisfacen la demanda diaria de agua de las comunidades, sino que también ayudan a prevenir riesgos sanitarios al asegurar un suministro seguro y controlado (World Health Organization, 2017). En un mundo afectado por el cambio climático y el rápido crecimiento urbano, los acueductos enfrentan desafíos importantes como la escasez de agua y la

contaminación, además de la necesidad de actualizar infraestructuras antiguas. Por eso, la gestión eficiente de estos sistemas es ahora una prioridad para gobiernos y organizaciones internacionales, que buscan mejorar su operatividad y sostenibilidad ambiental (Bartram, 2018).

Además de su función principal de suministrar agua potable, los acueductos son clave en la agricultura, la industria y la generación de energía hidroeléctrica, contribuyendo al desarrollo económico y asegurando la alimentación de las comunidades donde están ubicados. Estos beneficios adicionales resaltan su importancia multifacética en la infraestructura moderna (Herrera & Post, 2019).

En resumen, los acueductos no solo son esenciales para el bienestar y el desarrollo humano en la actualidad, sino también para preservar nuestros recursos naturales y adaptarnos al cambio climático. Su manejo eficiente y mantenimiento adecuado son fundamentales para asegurar un suministro continuo y sostenible de agua potable en un mundo en constante evolución (UN Water, 2020).

1.3. Partes de un acueducto

Un acueducto es un gran sistema compuesto de varias partes esenciales: las fuentes de agua, las obras de captación, las estaciones de bombeo, las plantas de tratamiento, las redes de distribución y los tanques de almacenamiento. Las fuentes de agua pueden estar en la superficie o bajo tierra, y las obras de captación son como enormes recolectores que toman el agua de estas fuentes de manera eficiente y segura. Las estaciones de bombeo, por otro lado, son como los corazones del sistema, impulsando el agua a través de terrenos difíciles o en elevaciones altas (Walski, 2003).

Luego están las plantas de tratamiento, que son vitales para limpiar y purificar el agua antes de que llegue a nuestras casas. Aquí, el agua pasa por procesos como la sedimentación, la filtración

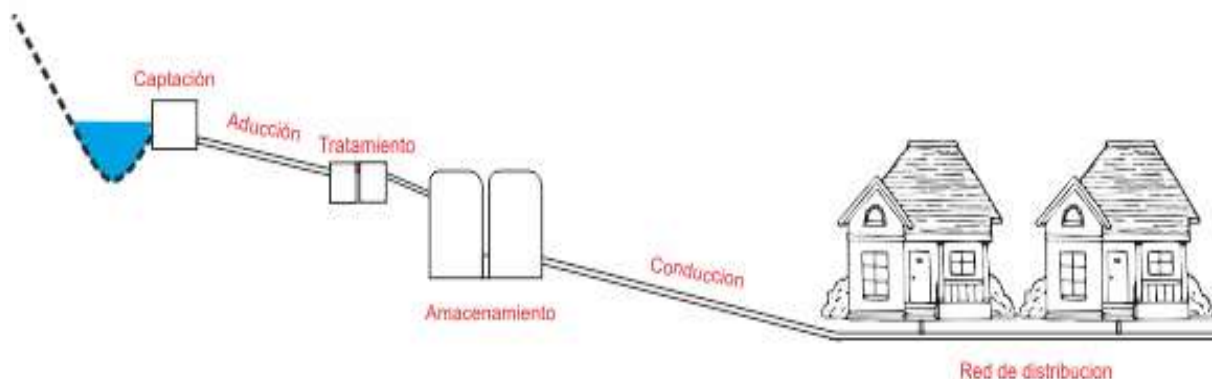
y la desinfección para asegurarse de que sea segura para beber. Desde allí, el agua se mueve a través de una red de tuberías que la conduce a nuestros hogares, negocios, instituciones y fábricas (Nevels, 2017).

Los tanques de almacenan agua temporalmente para equilibrar la demanda y asegurar que siempre haya disponibilidad del recurso. Estos tanques, que pueden estar por encima o por debajo del suelo, ayudan a mantener la presión en la red de distribución, asegurando un suministro continuo incluso durante los picos de demanda o cuando se necesita hacer mantenimiento (Novotny, 2007).

Mantener un acueducto en buen estado es un trabajo continuo que requiere una gestión y monitoreo constantes. Esto incluye encontrar y reparar fugas, actualizar infraestructuras antiguas y usar tecnologías de automatización y control remoto para mejorar la eficiencia. Además, los administradores de los acueductos tienen que enfrentar desafíos como el cambio climático, la escasez de agua y la creciente demanda debido al aumento de la población (Mohtar, 2014).

Figura 7.

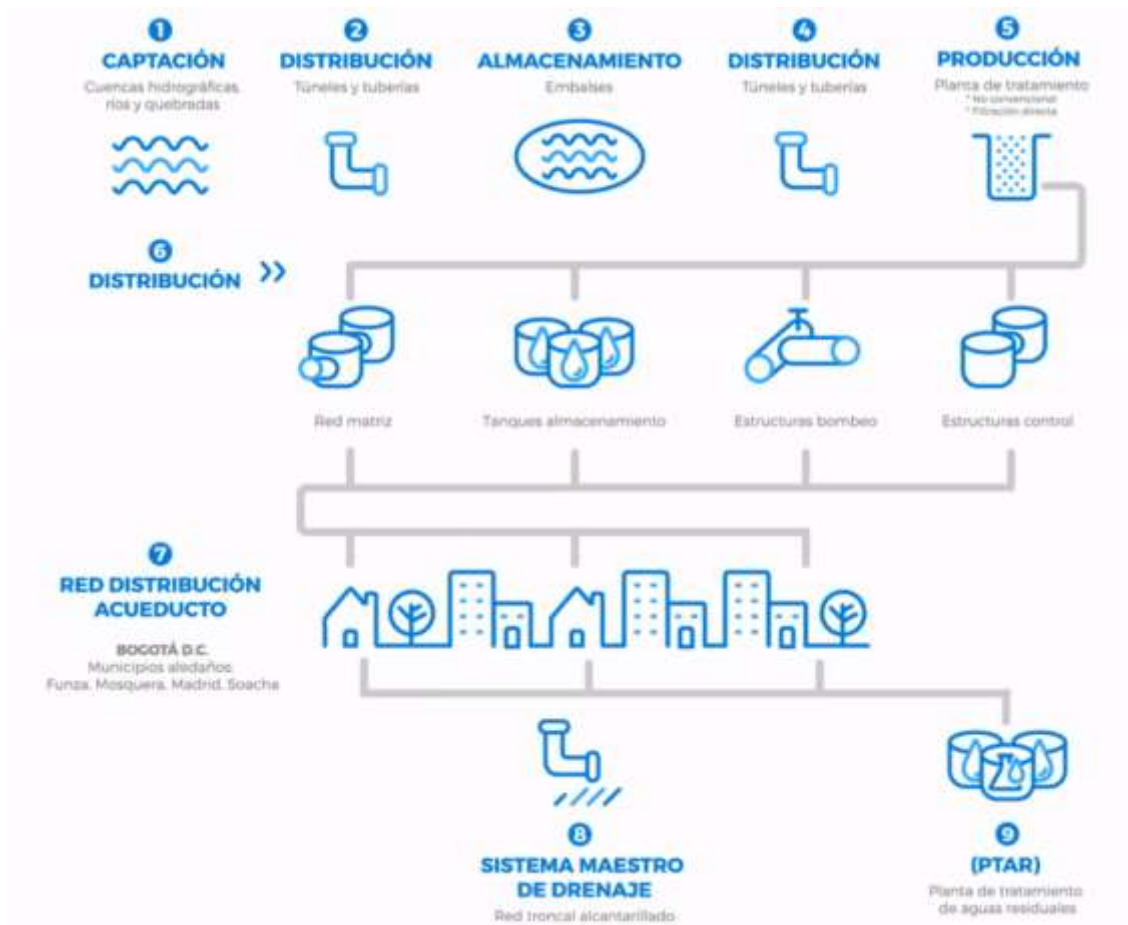
Partes de un acueducto



Nota. La figura muestra las partes de una red de acueducto de manera general. Fuente: (Moya & Moya, 2019).

Figura 8.

Infraestructura del acueducto



Nota. La figura muestra el proceso por el que pasa el agua desde la captación hasta llegar a la RDAP. Fuente: (Infraestructura Acueducto, Agua y Alcantarillado de Bogotá , (s/f)).

1.3.1. Fuentes de agua y captación

Las fuentes de captación de agua potable son los puntos naturales o artificiales donde se recoge el agua para su tratamiento y distribución a la población. Estas fuentes pueden ser superficiales, como ríos, lagos y embalses, o subterráneas, como acuíferos y pozos profundos. La selección y gestión adecuada de estas fuentes son fundamentales para asegurar un suministro continuo y seguro de agua potable para las comunidades (United Nations, 2017).

Los ríos y arroyos son fuentes comunes de agua para los acueductos debido a su abundancia y fácil acceso. La captación de estos cuerpos de agua requiere instalaciones de captación que pueden incluir barreras de desvío y estaciones de bombeo para llevar el agua a las plantas de tratamiento (Viessman & Hammer, 2005).

Los lagos naturales y los embalses artificiales almacenan grandes volúmenes de agua, lo que los convierte en fuentes de captación confiables y estables. Los embalses, además, permiten la regulación del flujo de agua para asegurar una disponibilidad constante. (Ward & Trimble, 2004)

Los acuíferos son formaciones geológicas que contienen agua subterránea. La captación en los acuíferos se realiza mediante pozos y sistemas de bombeo. Esta agua suele ser de alta calidad debido a la filtración natural a través del suelo y las rocas (Todd & Mays, 2005).

Los manantiales son fuentes naturales de agua subterránea que emergen a la superficie. Pueden ser una fuente de captación directa, especialmente en áreas donde el agua subterránea aflora de manera constante y limpia. (Freeze & Cherry, 1979). Es fundamental gestionar adecuadamente las fuentes de captación, lo que implica realizar monitoreos que permitan conocer la calidad del agua y proteger las fuentes de contaminación, además, se debe regular su uso para evitar la sobreexplotación del recurso.

Las bocatomas son estructuras hidráulicas diseñadas para captar agua de fuentes superficiales, como ríos o arroyos, con el fin de alimentar sistemas de abastecimiento de agua potable o para otros usos como riego y generación de energía hidroeléctrica. Estas estructuras suelen estar ubicadas estratégicamente en lugares donde el flujo de agua es adecuado y estable, permitiendo su captación de manera eficiente y controlada (Parks & Recreation Department, 2018).

El diseño de las bocatomas varía según el tipo de fuente de agua y las necesidades específicas del proyecto. Por lo general, incluyen compuertas, rejas o filtros que ayudan a regular y proteger el ingreso de agua, evitando la entrada de sedimentos, residuos u otros materiales que puedan contaminar el agua captada. Esto es crucial para asegurar la calidad del agua antes de que sea tratada y distribuida a los usuarios finales (American Society of Civil Engineers, 2020).

El agua entra en la bocatoma a través de rejillas de captación que filtran los desechos más grandes. Luego, el agua pasa por un canal de entrada que puede incluir compuertas para regular el flujo. Antes de llegar al sistema de aducción o a la estación de bombeo, el agua pasa por un desarenador que elimina partículas sólidas. Finalmente, el agua es conducida hacia las plantas de tratamiento (Novak, 2007).

Figura 9.

Bocatoma



Nota. La figura muestra una bocatoma a cargo de la empresa HIDROPACIFICO. Fuente: (Hidropacífico, 2019).

1.3.2. Aducción

Los sistemas de aducción son componentes críticos de los acueductos, responsables de transportar el agua desde las fuentes de captación hasta las plantas de tratamiento o directamente a los sistemas de distribución. Estos sistemas se encargan de que el agua llegue a su destino de manera eficiente, segura y en la cantidad necesaria para satisfacer las demandas de las comunidades. Estos están compuestos por tuberías y/o canales abiertos, válvulas de control y retención, accesorios, tanques de regulación y almacenamiento intermedio, medidores y sensores. Los sistemas de aducción son vitales para la eficiencia y fiabilidad del suministro de agua potable. Un diseño y operación adecuados de estos sistemas son cruciales para asegurar que las comunidades tengan acceso continuo y permanente al agua, lo cual es esencial para la salud pública, el desarrollo socioeconómico y la sostenibilidad ambiental (Viessman & Hammer, 2005).

Figura 10.

Línea de aducción de acueducto.



Nota. La figura muestra una tubería de aducción. Fuente: (Sistemas de Acueducto, (s/f)).

1.3.3. Plantas de tratamiento de agua potable PTAP

Una planta de tratamiento de agua potable (PTAP) es una instalación diseñada para purificar agua cruda, proveniente de fuentes de captación con el fin de hacerla segura y apta para el consumo humano. Este proceso implica varias etapas, como la coagulación, la sedimentación, la filtración y la desinfección, que eliminan contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en el agua (American Water Works Association, 2017).

El proceso de tratamiento en la planta inicia con la coagulación y floculación; se realiza la adición de coagulantes para desestabilizar partículas suspendidas y formar flóculos grandes a través de la floculación, facilitando su remoción en etapas posteriores. En el proceso de sedimentación el agua tratada con coagulantes y floculantes se deja reposar en tanques de sedimentación, permitiendo que los flóculos sedimenten en el fondo del tanque, retirando así gran parte de las impurezas. El agua pasa a través de filtros de arena, grava y carbón activado, eliminando las partículas restantes y mejorando la calidad del agua. La adición de desinfectantes como el cloro elimina microorganismos patógenos, asegurando que el agua sea microbiológicamente segura para el consumo humano. Finalmente, se ajusta el pH del agua para prevenir la corrosión de las tuberías (Viessman & Hammer, 2005).

Figura 11.

Planta de tratamiento de agua potable (PTAP)



Nota. La figura muestra una PTAP. Fuente: (Sistemas de Acueducto, (s/f)).

1.3.4. Almacenamiento

El almacenamiento de agua en acueductos es fundamental para asegurar un suministro constante y confiable de agua potable. Los acueductos modernos emplean diversas técnicas para el almacenamiento eficiente del agua, incluyendo embalses y tanques de almacenamiento distribuidos a lo largo del sistema de distribución. Estos depósitos ayudan a regular la presión en la red de distribución y garantizan un suministro continuo durante periodos de alta demanda mejorando la eficiencia y fiabilidad del sistema (Water UK, 2020)

Figura 12.

Tanque de almacenamiento



Nota. La figura muestra un tanque de almacenamiento de agua potable. Fuente: (Sistemas de Acueducto, (s/f)).

1.3.5. Conducción

El sistema de conducción en un acueducto se encarga de transportar el agua desde las plantas de tratamiento o sistemas de almacenamiento hasta la red de distribución de los municipios y ciudades. Este sistema debe ser diseñado para minimizar las pérdidas y mantener la calidad del agua durante su transporte. Las tuberías de conducción pueden estar hechas de acero, PVC, PEAD (polietileno de alta densidad) o concreto. La elección del material depende de factores como la presión, la durabilidad, el costo y la resistencia a la corrosión. El tamaño de las tuberías varía según el caudal de agua que deben transportar. Las principales líneas de conducción suelen ser de mayor diámetro para manejar grandes volúmenes de agua. La red de conducción cuenta con diferentes accesorios: válvulas de retención para prevenir el retroceso del flujo de agua, válvulas de alivio de presión que protegen el sistema de sobrepresiones que podrían dañar las tuberías y equipos, cámaras de inspección para mantenimiento y reparación y sistemas de monitoreo como lo son sensores de presión y caudal (Viessman & Hammer, 2005).

1.3.6. Redes de distribución de agua potable

Las redes de distribución de agua potable son sistemas complejos de tuberías y accesorios diseñados para llevar agua tratada desde las plantas de tratamiento hasta los puntos de consumo ubicados en zonas, residenciales, comerciales, institucionales o industriales. Estas redes son fundamentales para asegurar un suministro continuo y confiable de agua potable a los usuarios. Las redes de alta presión transportan agua desde las plantas de tratamiento a áreas más distantes y elevadas, utilizan tuberías de mayor diámetro y pueden requerir estaciones de bombeo para mantener la presión del agua a través de toda la red. Las redes de baja presión son de ámbito secundario que distribuyen agua desde las redes de alta presión hasta los puntos de consumo finales, como viviendas y edificios. Estas redes suelen tener tuberías de menor diámetro y operan

a presiones más bajas. Las tuberías pueden ser de acero, PVC (policloruro de vinilo), PEAD (polietileno de alta densidad) u otros materiales resistentes a la corrosión y duraderos. Los diámetros varían según el caudal de agua requerido y la distancia de distribución. La red de distribución está diseñada para mantener una presión y flujo adecuados en todo momento, asegurando que el agua llegue a los usuarios con la suficiente presión para satisfacer sus necesidades. Los medidores de flujo monitorean el volumen de agua consumido por los usuarios finales y ayudan en la gestión y facturación del agua (Mays, 2012).

Los sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) permiten supervisar, controlar y adquirir datos de equipos y procesos industriales de manera remota y en tiempo real. Se utilizan ampliamente en infraestructuras críticas como las redes de distribución de agua y el suministro de servicios públicos. La funcionalidad principal de los sistemas SCADA es su capacidad para monitorear y operar equipos y procesos de forma centralizada desde una ubicación remota. Esto incluye la visualización de datos operativos, el control de dispositivos y la recopilación de información histórica, lo que permite a los operadores tomar decisiones rápidas para optimizar el rendimiento y la eficiencia de los sistemas industriales. Además, esta tecnología juega un papel crucial en la seguridad cibernética, pues, proporciona funciones de autenticación, autorización, auditoría de accesos, encriptación de datos y protección contra intrusiones para proteger los sistemas críticos contra amenazas cibernéticas asegurando la seguridad de la información (International Society of Automation, 2017). La aplicación de este tipo de tecnologías permite gestionar y controlar el funcionamiento de la red de manera remota. El mantenimiento regular de las redes de distribución es crucial para prevenir fugas, reparar y reemplazar tuberías y asegurar la eficiencia operativa a largo plazo (Viessman & Hammer, 2005).

Figura 13.

Vista en planta de una red de distribución de agua potable.



Nota. La figura muestra la sectorización de una RDAP por la teoría de los grafos. Fuente: (Salguero, 2021).

La gestión de una red de distribución de agua potable es una labor compleja, especialmente en aquellas redes que abarcan grandes extensiones de territorio. No obstante, esta tarea puede simplificarse mediante la implementación de métodos que permitan una adecuada sectorización hidráulica. Para comprender el proceso de sectorización de las redes de distribución de agua, es esencial conocer de manera detallada el funcionamiento de la red, los parámetros de diseño que la rigen, así como la importancia y el alcance de estos sistemas.

Capítulo II. Redes de distribución de agua potable

La red de distribución es el conjunto de tuberías destinadas al suministro en ruta de agua potable a las viviendas y demás establecimientos municipales, públicos y privados. Estas redes parten de los tanques de almacenamiento y/o compensación e incluyen además de las tuberías, los nodos, las válvulas de control, las válvulas reguladoras de presión, las ventosas, los hidrantes, las acometidas domiciliarias y todos los demás accesorios y estructuras complementarias necesarios para la correcta operación del sistema (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017).

El diseño de una red de distribución de acueducto requiere tener en cuenta diversos factores como la capacidad de almacenamiento, la presión y el caudal del agua, la topografía del área servida y las demandas futuras. Las tuberías pueden variar en material y diámetro según las necesidades específicas del sistema y las características del entorno. Los materiales comúnmente utilizados son el hierro dúctil, PVC (policloruro de vinilo) y PEAD (polietileno de alta densidad), elegidos por su durabilidad y resistencia a la corrosión (Viessman & Hammer, 2005).

2.1 Importancia de las redes de distribución

Las redes de distribución de acueducto son cruciales para la salud pública, ya que aseguran que el agua potable, previamente tratada para eliminar contaminantes y patógenos, llegue de manera segura hasta los consumidores. Sin un sistema de distribución eficaz, las comunidades estarían expuestas a riesgos significativos de enfermedades transmitidas por el agua, lo que podría desencadenar brotes epidémicos y problemas de salud generalizados (Crittenden, 2012).

Además, estas redes permiten una gestión eficiente del recurso hídrico, minimizando las pérdidas por fugas y garantizando una distribución equitativa del agua. Esto es especialmente importante en áreas urbanas densamente pobladas, donde la demanda de agua es alta, y en regiones con recursos hídricos limitados. Una red bien diseñada y mantenida contribuye significativamente

a la sostenibilidad ambiental al optimizar el uso del agua disponible y reducir el (Davis & Cornwell, 2012).

En términos económicos, las redes de distribución de acueducto son fundamentales para el desarrollo industrial y comercial. Suministran el agua necesaria para los procesos industriales, operaciones comerciales y servicios públicos, lo que a su vez impulsa el crecimiento económico y el desarrollo urbano. La disponibilidad de agua confiable es un factor clave para la localización de nuevas empresas y el bienestar general de las comunidades (Walski, 2003).

Las redes de distribución también desempeñan un papel vital en situaciones de emergencia, como incendios o desastres naturales. La presencia de hidrantes y sistemas de bombeo integrados en la red permite una respuesta rápida y efectiva, salvando vidas y propiedades. Este aspecto de protección civil subraya la importancia de mantener y mejorar continuamente la infraestructura de distribución de agua (Viessman & Hammer, 2005).

2.2 Funcionamiento de las redes de distribución

Los sistemas de distribución están compuestos de: red matriz, tanques de almacenamiento y de estaciones de control y de bombeo y redes menores. Los sistemas de distribución de agua potable deben cumplir con los siguientes requisitos principales:

1. Suministrar agua potable a todos los usuarios en la cantidad y calidad necesarias y exigidas por la legislación pertinente.
2. Proveer suficiente agua para combatir incendios en cualquier punto del sistema.
3. Proveer agua para otros tipos de uso, tales como fuentes, servicios públicos, etc. (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017).

2.2.1 Red matriz

La red de distribución primaria o red matriz de acueducto, es el conjunto de tuberías mayores que son utilizadas para la distribución de agua potable, que conforman las mallas principales de servicio en el municipio y que distribuyen el agua procedente de las líneas expresas o de la planta de tratamiento hacia las redes menores de acueducto. Las redes matrices son los elementos sobre los cuales se mantienen las presiones básicas de servicio para el funcionamiento correcto del sistema de distribución general. Para todos los niveles de complejidad del sistema no puede haber conexiones directas de suscriptores a las tuberías que conforman la red matriz (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017).

Figura 14.

Red matriz de acueducto de Bogotá.



Nota. La figura muestra una parte de la red matriz del acueducto de Bogotá, localidad Los Mártires. (Representada en la figura de color azul oscuro) Fuente: Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) de Bogotá (s/f).

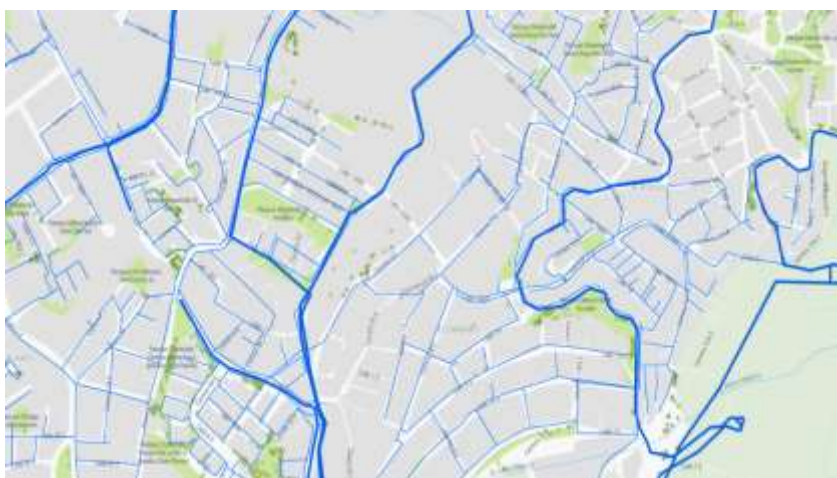
2.2.2 Redes menores

Estas redes de distribución deben conformar circuitos cerrados por interconexiones en los puntos de cruce, o pueden ser independientes, siempre y cuando en el futuro se prevea su alimentación por los dos extremos y se garantice que se cumpla con la presión y la colocación conjunta de las tuberías principales de alimentación. La red de distribución debe ser doble, con la ubicación de las tuberías en los dos andenes, o junto a ellos cuando ocurra cualquiera de los siguientes casos: (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017).

- La red está ubicada en una calle que sea considerada como vía arteria por las autoridades municipales.
- El ancho de la calle sea mayor que 15 m.
- Un análisis económico involucrando el costo de las acometidas y de las tuberías concluya que sea más económica la instalación de una red doble.

Figura 15.

Redes menores del acueducto de Bogotá.



Nota. La figura muestra una parte de la red matriz (Representada en la figura de color azul oscuro) y redes menores (Representadas en la figura de color azul claro) del acueducto de Bogotá

Fuente: Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) de Bogotá (s/f).

2.3 Parámetros importantes de las redes de distribución

Dentro de la ejecución del diseño de un sistema de redes de distribución de agua potable es necesaria una etapa inicial de conceptualización y planeamiento que garantice que el esquema de obras propuesto atienda los requerimientos futuros de la demanda de agua en cuanto a cantidad, calidad y oportunidad. Los parámetros de diseño constituyen los elementos básicos para el desarrollo del diseño de un sistema de abastecimiento de agua potable. Es función del Viceministerio de Agua y Saneamiento, apoyado en la Junta Técnica Asesora del presente documento, establecer los mecanismos, procedimientos y metodologías para la revisión, la actualización y la aceptación de los parámetros y valores para el diseño de sistemas de acueducto (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017).

2.3.1 Periodo de diseño

Para todos los componentes de los sistemas de acueducto, alcantarillado y aseo, se establece un período de diseño de 25 años. Parágrafo: Para proyectos especiales relacionados con agua y saneamiento básico, como aquellos derivados de alianzas público-privadas, túneles de conducción, embalses, derivaciones, grandes conducciones y disposición de residuos sólidos, se puede aceptar un período de diseño más largo, siempre que se realicen los análisis técnicos y económicos que lo justifiquen (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017).

2.3.2 Profundidades para la instalación de tuberías

Profundidad máxima: La profundidad de instalación de las tuberías que conforman la red de distribución no debe exceder de 1.50 m., medidos desde la clave de la tubería hasta la superficie del terreno (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021).

Profundidad mínima: Para definir la profundidad mínima de instalación de las tuberías que conforman la red se debe tener en cuenta la servidumbre y la ubicación de la vía (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021).

2.3.3 Presión

Presiones mínimas de servicio en la red de distribución. La presión dinámica mínima en la red de distribución debe ser de 10 m.c.a. en sistemas diseñados para hasta 12.500 habitantes. Para sistemas diseñados para más de 12.500 habitantes, la presión dinámica mínima debe ser de 15 m.c.a. Parágrafo: Hasta el 10% del área total puede tener una presión dinámica inferior, siempre que la presión mínima sea de al menos 8 m.c.a para sistemas con hasta 12.500 habitantes y de 12 m.c.a para sistemas con más de 12.500 habitantes. Además, hasta el 5% del área total puede tener una presión dinámica inferior, siempre que la presión mínima sea de al menos 5 m.c.a para sistemas con hasta 12.500 habitantes y de 10 m.c.a para sistemas con más de 12.500 habitantes (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017).

Presiones máximas de servicio en la red de distribución. A partir de la emisión de la resolución 0799 de 2021, para nuevos sistemas u optimizaciones, la presión estática máxima debe ser de 50 m.c.a. Para lograr esto, la red de distribución debe dividirse en tantas zonas de presión como sean necesarias. Parágrafo: En una misma zona de presión, pueden darse presiones estáticas superiores a la máxima definida; en este caso, el área con una presión estática superior puede ser hasta el 10% del área de la zona de presión, siempre que no exceda una presión de 55 m.c.a., y hasta el 5% del área de la zona de presión, siempre que no supere una presión de 60 m.c.a (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021).

2.3.4 Velocidad

La velocidad mínima debe ser de 0.5 m/s o aquella que produzca un esfuerzo cortante mínimo de 1.50 Pa en la pared de la tubería. La velocidad máxima no debe exceder los límites recomendados para el material del ducto y/o los accesorios correspondientes. (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021).

2.3.5 Caudal

Los caudales de diseño de cada uno de los componentes del sistema de acueducto, según las variaciones diarias y horarias que pueden presentar, se establecen en la siguiente tabla (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017):

Tabla 1.

Caudales de diseño hidráulico de cada uno de los componentes de sistemas de acueducto.

COMPONENTE	CAUDAL DE DISEÑO
Captación fuente superficial	Hasta 2 veces QMD
Captación fuente subterránea	QMD
Desarenador	QMD
Aducción	QMD
Conducción	QMD
Tanque	QMD
Red de Distribución	QMH

Nota. Esta tabla muestra que el caudal de diseño hidráulico para una RDAP será el caudal máximo horario (QMH). Fuente: (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017).

2.3.6 Diámetros de tuberías

Diámetro interno real mínimo en la red de distribución. El diámetro mínimo en las redes de distribución no deberá ser inferior a 75 mm para sectores urbanos, mientras que para sectores rurales no deberán ser inferiores a 50 mm. En caso contrario, se deben realizar los cálculos necesarios que permitan garantizar que, con el diámetro interno real de la tubería seleccionada, se

cumplan las condiciones mínimas establecidas (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021).

2.4. Fugas en las redes de distribución de agua potable

Las fugas dentro de una red de distribución de agua plantean un desafío considerable en términos de mantener la eficiencia operativa y asegurar la sostenibilidad a largo plazo del sistema (Smith, 2019). La pérdida de agua debido a fugas no solo compromete la disponibilidad del recurso hídrico, sino que también tiene un impacto económico significativo para las entidades responsables de la gestión de estas redes (Jones & Brown, 2020). El origen de las fugas puede surgir por diversos factores, como la corrosión de las tuberías, el desgaste mecánico y la presión inapropiada en el sistema (García et al., 2021).

Es fundamental la detección temprana de las fugas presentes en la red. Además, de realizar reparaciones rápidas para reducir las pérdidas y mejorar la eficacia del sistema de distribución de agua (Brown & Williams, 2017). Gestionar de manera efectiva las fugas en las redes de distribución de agua es esencial para asegurar la sostenibilidad a largo plazo del suministro de agua potable. Adoptar prácticas de mantenimiento preventivo y tecnologías innovadoras puede contribuir significativamente a la mitigación de pérdidas y a mejorar la eficiencia operativa de estas infraestructuras (White & Miller, 2019).

Teniendo en cuenta que los problemas presentes en una RDAP, como las fugas, pueden representar afectaciones socioeconómicas tanto para los entes prestadores del servicio como para la comunidad. Hace que exista la necesidad de buscar métodos que optimicen el funcionamiento del sistema, un proceso destacado para abordar estas problemáticas es la sectorización de la red de distribución de agua potable, sus beneficios y aplicaciones serán descritas en el siguiente capítulo.

Capítulo III. Sectorización hidráulica de redes de distribución

A lo largo de la historia humana, la distribución de agua en las grandes ciudades se ha solucionado mediante la creación de redes de distribución de agua potable (RDAP). Estas redes permiten llevar el agua desde las fuentes de suministro, que pueden estar ubicadas fuera de la ciudad, hasta los puntos de consumo repartidos por toda la zona urbana. Al principio, los primeros sectores independientes no se regulaban por presión, sino por el volumen de agua que podía ser distribuido a cada sector (González et al., 2017).

Cada vez que se construye una nueva red de distribución o se amplía una existente, pueden surgir efectos hidráulicos que afectan la operación de otras zonas de la red de agua potable. Por lo tanto, para facilitar la operación global del sistema, el diseño debe incluir y la entidad prestadora de servicios públicos debe implementar modificaciones en los sectores o subsectores de la red. Esto tiene como objetivo lograr una mejor uniformidad de presiones y una sectorización basada en criterios hidráulicos. Para alcanzar este objetivo, el diseño debe prever y ejecutarse, cuando sea necesario, una nueva disposición de válvulas y la apertura y/o cierre de válvulas existentes, con el fin de modificar la topología de la red de distribución de agua potable (Pérez et al, 2015).

La sectorización de las RDAP implica la delineación de áreas en la red mediante límites físicos, minimizando la separación de tuberías de distribución. Esto facilita la instalación de macromedidores en estas áreas para medir los volúmenes de agua consumidos, lo que permite compararlos con la micromedición de cada sector. Este proceso establece un indicador de pérdidas o de agua no facturada, permitiendo identificar fugas, pérdidas de presión para proceder a su reparación y optimización de las redes (Martínez & López, 2018).

La sectorización de una RDAP se refiere a la división de la red en varios grupos de tuberías, estableciendo características comunes para cada grupo. Esta ocurre cuando estas divisiones

conocidas como sectores hidráulicos crean fronteras que impiden el flujo de agua entre diferentes partes y la característica común del grupo de tuberías es la fuente de su suministro. Un sector hidráulico se define como una sección de la red aislada hidráulicamente de los demás sectores del sistema de distribución, donde los únicos puntos de conexión son las entradas de agua al sector o las salidas de agua hacia otros sectores (Saldarriaga et al., 2008).

Los elementos principales para la sectorización de una red de distribución son los siguientes:

- **Válvulas de corte y control:** Las válvulas de corte se emplean para abrir o cerrar distintos tramos de tuberías en las redes de distribución, especialmente en las redes secundarias. Su principal función es aislar sectores durante procesos de sectorización, tareas de mantenimiento, y situaciones de emergencia como rupturas de tuberías o eventos de coloración del agua provocados por desprendimiento de películas biológicas o depósitos inorgánicos dentro de las redes (González et al., 2017).
- **Macromedidores:** El diseño de una red de distribución de agua potable debe incluir la instalación de macromedidores. Estos dispositivos tienen como finalidad recopilar los datos necesarios sobre los caudales de consumo, permitiendo así realizar un balance hídrico en cada uno de los sectores de la red. Este balance es crucial tanto para la operación y el mantenimiento de la red como para su planificación futura, además de ser esencial para implementar programas de control de fugas y reducir el índice de agua no contabilizada (Pérez et al., 2015).
- **Sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition):** Es un sistema utilizado para la supervisión y control remoto de la red, facilitando la detección de anomalías y la gestión eficiente (International Society of Automation, 2017).

Figura 16.

Sectorización Hidráulica de una Red de Distribución de Agua Potable.



Nota. Esta figura muestra la metodología generalizada para sectorizar una red de distribución de agua potable. Fuente: Elaboración propia.

3.1 Ventajas y limitaciones de la sectorización hidráulica

La sectorización hidráulica implica dividir la red de distribución de agua en zonas más pequeñas y manejables, conocidas como sectores o distritos de medición y control. Cada sector está controlado por una serie de válvulas y dispositivos de medición que permiten monitorear y gestionar el flujo y la presión del agua de manera independiente (Salguero, 2021).

Las ventajas más significativas de la sectorización de redes de distribución son las siguientes:

- **Reducción de Pérdidas:** La sectorización permite identificar y localizar fugas de agua de manera más rápida. Al tener zonas más pequeñas y específicas, los equipos de mantenimiento pueden intervenir con mayor precisión, reduciendo el tiempo y los recursos necesarios para reparar fugas. Además, permite detectar conexiones fraudulentas en cada sector, especialmente en áreas de gran consumo como zonas comerciales, agrícolas e industriales, lo que ayuda a proteger la prestación del servicio (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2020).
- **Mejora en la Gestión de la Presión:** Al poder controlar la presión en cada sector de manera independiente, se pueden evitar excesos que provoquen rupturas en las tuberías y se puede asegurar una presión adecuada en todas las áreas de servicio (González, 2017).
- **Optimización del Mantenimiento:** La sectorización facilita el mantenimiento preventivo y correctivo, ya que permite aislar áreas específicas sin afectar el suministro en toda la red. Esto resulta en menos interrupciones del servicio para los usuarios (Torres & Rodríguez, 2015).
- **Monitoreo y Control:** La instalación de dispositivos de medición en cada sector, como macromedidores y sensores de presión, proporciona datos en tiempo real sobre el

funcionamiento de la red. Estos datos son cruciales para la toma de decisiones y la gestión proactiva del sistema (Rodríguez., 2018).

La técnica de sectorización de los sistemas de distribución presenta grandes ventajas para su operatividad y eficiencia, sin embargo, la implementación de la sectorización puede presentar algunas limitaciones, como:

- Ramificación de las redes: La creación de sectores puede llevar a una mayor ramificación de las redes, sobre todo en redes existentes, esto puede complicar la operación y el mantenimiento debido a la necesidad de gestionar múltiples conexiones adicionales (Alegre et al., 2006).
- Disminución de la fiabilidad del suministro: La red pierde posibles líneas de transporte, con lo que la probabilidad de fallas en el suministro del servicio aumenta en el tiempo, lo que genera la disminución de garantía de suministro respecto a la red mallada inicial (Yazdani & Jeffrey, 2011).
- Disminución de la robustez del sistema: La red perderá capacidad hidráulica para la conducción del caudal requerido, lo que podría provocar una disminución de la presión y creando puntos críticos que no se presentaban en la red de distribución (Farley & Liemberger, 2005).
- Aumento del tiempo de permanencia del agua y creación de puntos muertos: Al ejecutar cierres de los sectores, por la ramificación de las redes, se aumenta el recorrido del agua hasta el punto de consumo, generando puntos muertos en la tubería y provocando el estancamiento de la misma, este estancamiento puede generar afectaciones a la calidad del agua, aunque cuando los cortes se realizan por periodos de corto tiempo, este factor no es representativo (Farley & Liemberger, 2005).

- Necesidad de una inversión económica inicial y de operación significativa: Implementar la técnica de sectorización implica inevitablemente un gasto. En primer lugar, es necesario equipar la infraestructura conforme a los requisitos determinados en la fase de diseño. Luego, la sectorización de la red exige costos anuales de mantenimiento para asegurar el correcto funcionamiento de los equipos y las comunicaciones. Además, en algunos casos, puede ser necesario reforzar ciertos tramos de tubería para garantizar la presión de suministro (Salguero, 2021).
- Disminución de la presión y creación de nuevos puntos críticos: La creación de sectores puede llevar a una disminución de la presión en ciertas áreas de la red, lo que puede afectar el suministro de agua a los usuarios finales. Además, pueden surgir nuevos puntos críticos en la red que requieran una gestión adicional (Farley & Liemberger, 2005).
- Posibles aumentos del consumo energético: La implementación de sistemas automatizados para el control de la red sectorizada puede aumentar el consumo energético. Estos sistemas requieren energía para operar, lo que puede incrementar los costos operativos y el impacto ambiental de la red de distribución (Tzatchkov et al., 2006).

3.2 Criterios de sectorización hidráulica

Los criterios de sectorización de las redes de distribución definen la forma, las razones o los principios que se utilizan para dividir la RDAP en diferentes sectores. Considerando los criterios hidráulicos de sectorización más relevantes se identifican cinco tipos que son los más predominantes (Saldarriaga et al., 2008), los cuales son:

3.2.1 Sectorización por límites naturales

La sectorización por límites naturales se refiere a que la subdivisión de una RDAP en áreas más pequeñas se realice haciendo uso de características geográficas y topográficas naturales, como ríos, montañas, valles y otras barreras físicas naturales, como fronteras de sectorización (Araujo et al., 2006).

La principal ventaja de utilizar límites naturales como criterio para la sectorización es la reducción de complejidades operativas y la mejora en la eficiencia del sistema de distribución (Di Nardo et al., 2013). Gracias a la existencia de barreras naturales que proporcionan fronteras claramente definidas que simplifican la gestión y la monitorización de la red, permitiendo un control más preciso de la presión y el flujo de agua en cada sector (Pérez et al., 2011)

La sectorización basada en límites naturales facilita la implementación de tecnologías avanzadas de monitoreo y control, como sistemas de telemetría y sensores inteligentes, para la detección y localización de fugas (Farley & Trow, 2003).

La metodología para aplicar el criterio de sectorización por límites naturales se divide en los siguientes pasos:

- Paso I: Identificación de límites naturales

El primer paso en la sectorización por límites naturales es la identificación de características geográficas y topográficas que pueden servir como fronteras naturales. Estas características incluyen ríos, montañas, valles y otras barreras físicas que naturalmente dividen el terreno (Araujo et al., 2006). La identificación precisa de estos límites es crucial para definir sectores que sean geográficamente coherentes y manejables (Di Nardo et al., 2013).

- Paso II: Análisis hidráulico y topográfico

Una vez identificados los límites naturales, se realiza un análisis hidráulico y topográfico detallado para comprender cómo estas características afectan el flujo y la presión del agua en la red de distribución (Herrera et al., 2010). Este análisis ayuda a determinar la viabilidad de utilizar ciertos límites naturales y a planificar la distribución del flujo de agua en los sectores propuestos (Farley & Trow, 2003).

- Paso III: Delimitación de sectores

Basado en el análisis hidráulico y topográfico, se procede a la delimitación de los sectores. Estos sectores deben ser homogéneos en términos de demanda de agua y características hidráulicas para asegurar una distribución eficiente y equitativa del recurso (Pérez et al., 2011). Los límites naturales se utilizan para definir las fronteras de estos sectores, aprovechando las barreras físicas para simplificar la gestión y el monitoreo (Puust et al., 2010).

- Paso IV: Implementación de tecnologías de monitoreo

Una vez delimitados los sectores, se implementan tecnologías de monitoreo como sistemas de telemetría y/o sensores de flujo y presión, con el objetivo de supervisar el funcionamiento de cada sector. Estas tecnologías permiten una gestión en tiempo real y la detección rápida de problemas como fugas o variaciones de presión, mejorando la eficiencia operativa del sistema de distribución (Puust et al., 2010).

- Paso V: Evaluación y ajuste

Finalmente, se lleva a cabo una evaluación continua de la sectorización y del funcionamiento de los sectores definidos. Basado en los datos recopilados a través de los sistemas de monitoreo, se realizan ajustes y optimizaciones para mejorar la eficiencia de la red. Este proceso de evaluación y ajuste es crucial para asegurar que la sectorización siga siendo efectiva a lo largo del tiempo (Pérez et al., 2011).

La sectorización de la red de distribución de agua potable de la ciudad de Matamoros, ubicada al noroeste del estado de Tamaulipas, México. Es un ejemplo de la eficacia de utilizar barreras naturales, como las montañas, para la sectorización de una RDAP. En esta región, las montañas se emplearon como límites de los sectores, lo que permitió una clara delimitación y facilitó la gestión del sistema. Este enfoque redujo significativamente las pérdidas de agua debido a que las barreras naturales impidieron la propagación de fugas y facilitaron la detección y reparación de las mismas. Además, la gestión operativa del sistema mejoró notablemente, ya que la sectorización permitió un control más preciso de la presión y el flujo de agua en cada sector (Di Nardo et al., 2013).

Figura 17.

Sectorización de la RDAP de Matamoros.

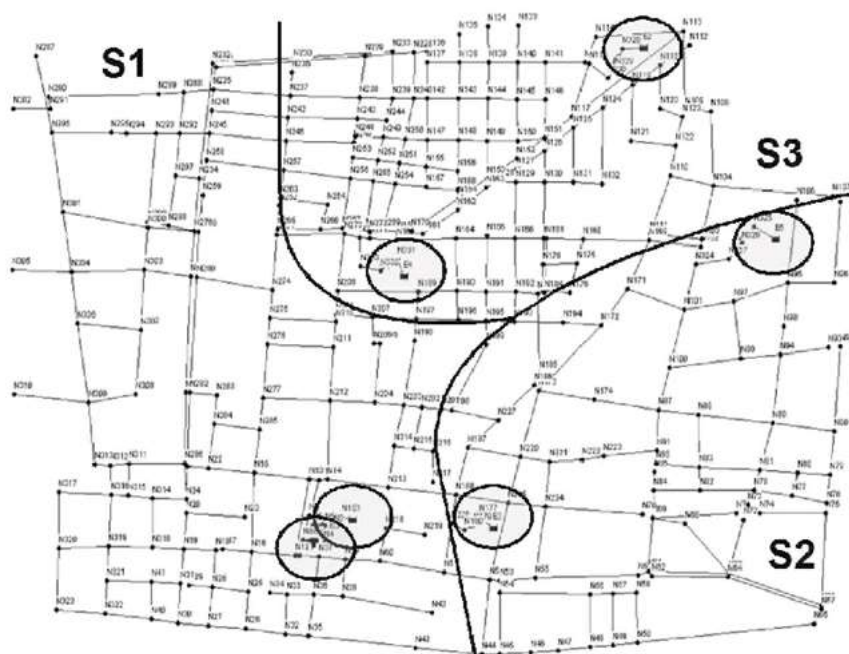


Nota. La figura muestra la división de la RDAP de Matamoros en nueve sectores, dicha sectorización fue realizada haciendo uso del criterio de límites naturales. Fuente: (Di Nardo et al., 2013).

Otro ejemplo relevante se llevó a cabo en la zona urbana de Barcelona, España. Esta ubicación se caracteriza por la presencia de numerosos cursos de agua, como ríos y canales. Estos cuerpos de agua se utilizaron como límites naturales para la sectorización en tres áreas de medición distrital. La elección de estos límites permitió una gestión más eficiente de la red de distribución, ya que los ríos y canales proporcionaron fronteras claramente definidas y fácilmente monitorizables (Herrera et al., 2010).

Figura 18.

Sectorización de RDAP de Barcelona, España.



Nota. La figura muestra las tres áreas de medición distrital, realizada por el criterio de sectorización por límites naturales, en las que se encuentra dividida la RDAP de Barcelona, España. Fuente: (Herrera et al., 2010).

3.2.2 Sectorización por pérdidas de energía

El criterio de sectorización por pérdidas de energía se centra en la identificación y subdivisión de la red de distribución de agua en sectores donde las pérdidas de energía existentes, asociadas

principalmente a las pérdidas de presión y fugas, son mínimas (Giustolisi & Ridolfi, 2014). Este método tiene como objetivo mejorar el funcionamiento del sistema de distribución de agua al reducir ineficiencias y optimizar la gestión de este recurso (Di Nardo et al., 2013).

Una de las ventajas de la sectorización por pérdidas de energía es que mejora significativamente la distribución del agua. Al reducir las pérdidas de energía, disminuye el desperdicio de este recurso hídrico y se utiliza de manera más eficiente la presión en el sistema, lo que se traduce en un suministro del servicio más confiable y constante para los usuarios (Giustolisi & Ridolfi, 2014). Otra ventaja importante es el incremento de la sostenibilidad ambiental del sistema. Pues, al minimizar las pérdidas de energía, se reduce el consumo de energía requerido para el bombeo y la distribución del agua, lo que ayuda a la reducción de la huella de carbono asociada a la red de distribución (Farley & Trow, 2003).

La metodología para aplicar el criterio de sectorización por pérdidas de energía se divide en los siguientes pasos:

- Paso I: Identificación de áreas críticas

El primer paso en esta metodología es identificar las áreas críticas dentro de la red de distribución donde las pérdidas de energía son significativas. Esto se realiza mediante un análisis hidráulico detallado que evalúa las presiones y flujos en diferentes puntos de la red. Las zonas con mayores pérdidas de presión y caudales de fugas se consideran prioritarias para la sectorización por este criterio (Giustolisi & Ridolfi, 2014).

- Paso II: Delimitación de sectores

Después de identificar las áreas críticas, se procede a subdividir los sectores. Estos sectores deben ser uniformes en cuanto a la demanda de agua y características hidráulicas para garantizar una distribución equitativa y eficiente del recurso. Los límites de los sectores se definen de manera

que las pérdidas de energía dentro de cada sector sean mínimas y manejables (Di Nardo et al., 2013).

- Paso III: Implementación de tecnologías de monitoreo

Para gestionar eficazmente los sectores establecidos, se implementan tecnologías de monitoreo avanzadas, como sistemas de telemetría y sensores de presión y flujo. Estos dispositivos permiten la monitorización en tiempo real del funcionamiento de cada sector, facilitando la detección rápida de problemas y la optimización continua de la RDAP (Creaco et al., 2016).

- Paso IV: Evaluación y ajuste

La evaluación continua del desempeño de los sectores es fundamental para mantener la eficiencia operativa. Los datos recopilados a través de los sistemas de monitoreo se analizan regularmente para identificar oportunidades de mejora y ajustar la sectorización según sea necesario (Giustolisi & Ridolfi, 2014). Este proceso de retroalimentación constante garantiza que la RDAP opere de manera óptima y que las pérdidas de energía se mantengan en rangos mínimos (Di Nardo et al., 2013).

Un ejemplo de aplicación de este criterio de sectorización se presenta en un estudio realizado para la red de distribución de agua en la ciudad Bari, Italia aplicó la sectorización por pérdidas de energía para identificar y mitigar áreas problemáticas. Utilizando análisis hidráulicos avanzados, se subdividió la red en diecisiete sectores con características homogéneas de presión y demanda. Lo que permitió una detección más rápida de fugas y una reducción significativa en las pérdidas de agua y energía. Los resultados mostraron una mejora notable en la eficiencia operativa y una reducción en los costos de operación (Giustolisi & Ridolfi, 2014). Otro ejemplo que se destaca de este criterio de sectorización es el estudio de la RDAP de la ciudad de Almería, España. Donde se implementó la sectorización por pérdidas de energía para mejorar la gestión del sistema de

distribución de agua. A través de un análisis detallado, se identificaron áreas con altas pérdidas de energía y la red fue reconfigurada en once sectores más pequeños y manejables. Este enfoque no solo redujo las pérdidas de agua, sino que también mejoró la capacidad de respuesta a los inconvenientes (Creaco et al., 2016).

3.2.3 Sectorización por caudal

La sectorización por caudal es un criterio usado en la gestión de redes de distribución de agua, en el cual se divide la RDAP en sectores más pequeños, basándose en el flujo de agua que pasa a través de ellos. Este criterio implica instalar dispositivos de medición de caudal en puntos estratégicos para monitorear y controlar el flujo en cada sector. La principal finalidad es identificar y reducir las pérdidas de agua, mejorar la eficiencia operativa y garantizar una distribución equitativa del recurso hídrico (Duran & Restrepo, 2019). Este método permite gran control sobre la distribución y el consumo del recurso hídrico, así como la identificación de anomalías en el flujo que podrían indicar problemas como fugas o conexiones no autorizadas (Fernández et al., 2020).

Un beneficio clave de sectorizar usando el criterio del caudal es la equidad en la distribución del agua. Este criterio permite una distribución más uniforme y justa del recurso, evitando situaciones de sobreabastecimiento o desabastecimiento en diferentes puntos de la RDAP. Esto es particularmente importante en regiones donde la demanda de agua supera la oferta disponible (Rodríguez & Gómez, 2018).

La metodología para aplicar el criterio de sectorización por caudal se divide en los siguientes pasos:

- Paso I: Análisis preliminar de la red

El primer paso en la sectorización por caudal es realizar un análisis preliminar de la red de distribución existente. Esto incluye la recopilación de datos detallados sobre la infraestructura de la red como tuberías, válvulas, bombas y puntos de consumo. Se debe evaluar el estado actual de la red, identificando las áreas con mayores problemas de pérdidas de agua y aquellas con mayor demanda (González et al., 2020).

- Paso II: Diseño de los sectores

Una vez completado el análisis preliminar, el siguiente paso es el diseño de los sectores. Esto implica dividir la red en distritos de medición y control (DMC) basados en criterios como la topografía, el tipo de usuarios y la demanda de agua. Cada sector debe ser lo suficientemente pequeño para permitir un monitoreo eficaz, pero también lo suficientemente grande para ser económicamente viable (López & Sánchez, 2019). Es necesario definir límites precisos para cada sector e identificar los puntos estratégicos para la instalación de los medidores de caudal.

- Paso III: Instalación de equipos de medición

El siguiente paso en la metodología consiste en instalar equipos de medición de caudal en los puntos designados previamente. Estos dispositivos deben ser precisos y confiables, capaces de proporcionar datos en tiempo real sobre el flujo de agua en cada sector (Martínez et al., 2021). La selección de los equipos adecuados es esencial, ya que una medición incorrecta puede comprometer todo el proceso de sectorización.

- Paso IV: Monitoreo y análisis de datos

Una vez instalados los equipos de medición, se comienza la fase de monitoreo continuo. Los datos recopilados por los medidores de caudal deben ser analizados regularmente para identificar cualquier anomalía en el flujo de agua, como fugas o problemas de presión (Fernández et al.,

2020). El uso de sistemas de información geográfica (SIG) y software especializado puede facilitar tanto el análisis como la visualización de los datos, contribuyendo a la toma de decisiones informadas para la gestión de la red.

- Paso V: Intervención y mantenimiento

La etapa final de la metodología abarca la intervención y el mantenimiento. Utilizando los datos obtenidos del monitoreo, es necesario planificar y llevar a cabo las intervenciones necesarias para reparar fugas y mejorar la infraestructura de la red. También es fundamental establecer un programa de mantenimiento preventivo para garantizar el correcto funcionamiento de los equipos de medición y la integridad de la red a largo plazo (García et al., 2019). Este enfoque proactivo contribuye a reducir las pérdidas de agua y a mantener la eficiencia del sistema.

En Madrid, España la empresa de acueducto implementó una sectorización por el criterio de caudal que permitió reducir significativamente las pérdidas de agua. Mediante la instalación de medidores de caudal en puntos estratégicos, lograron identificar y reparar fugas rápidamente, resultando en una mejora notable en la eficiencia del sistema (Aguas de Madrid, 2019).

Un ejemplo se presenta en Santiago de Chile que adoptó este criterio de sectorización en su red de distribución de agua potable. La sectorización por caudal ayudó a gestionar mejor la red en la ciudad con grandes variaciones de demanda estacional. Gracias a esta estrategia, Santiago ha podido reducir las pérdidas de agua y mejorar la calidad del servicio a sus habitantes (Aguilar et al., 2020).

3.2.4 Sectorización por presión

La sectorización mediante el criterio de presión se define como la división de una red de distribución de agua en sectores o zonas de presión, cada una con un control específico de la presión del agua. Esto se logra mediante la instalación de válvulas de control de presión y otros

dispositivos que regulan la presión dentro de cada sector. El objetivo es asegurar que cada área reciba la presión adecuada para sus necesidades específicas con el fin de minimizar el riesgo de fugas (Martínez & Gómez, 2019). La sectorización por presión se centra en mantener niveles de presión óptimos y constantes, lo que es crucial para el rendimiento y la vida útil de la infraestructura de distribución (Díaz et al., 2020).

Al controlar la presión en diferentes puntos, se puede evitar la sobrepresurización de la red, que es una de las principales causas de fugas en las redes de distribución de agua potable. Mantener la presión dentro de rangos óptimos reduce el estrés en las tuberías y minimiza las posibilidades de rupturas. Si la red cuenta con niveles de presión adecuados y constantes, se asegura que todos los usuarios reciban un suministro de agua confiable y de calidad. Esto es especialmente importante en áreas con variaciones de altitud o en sistemas de distribución complejos (Rodríguez & Hernández, 2021).

La metodología para aplicar el criterio de sectorización por presión se divide en los siguientes pasos:

- Paso I: Análisis de la red

El primer paso para aplicar la sectorización por presión es realizar un análisis detallado de la red de distribución existente. Esto incluye la identificación de zonas con problemas de presión, la evaluación de la infraestructura actual y la recopilación de datos sobre el consumo y la demanda de agua (García et al., 2020).

- Paso II: Diseño de sectores de presión

Con base en el análisis inicial, se procede al diseño de los sectores de presión. Se deben determinar los puntos estratégicos para la instalación de válvulas de control de presión y otros dispositivos reguladores (López & Sánchez, 2019).

- Paso III: Instalación de equipos de control de presión

El siguiente paso es la instalación de los equipos de control de presión requeridos en los puntos de la red previamente definidos. Esto incluye válvulas reductoras de presión, sensores y otros dispositivos necesarios para monitorizar y regular la presión dentro de cada sector. La elección de equipos de alta calidad y precisión es crucial para asegurar un control efectivo (Martínez et al., 2021).

- Paso IV: Monitoreo

Una vez instalados los equipos, se inicia una fase de monitoreo continuo para asegurarse de que la presión en cada sector se mantenga dentro de los rangos óptimos. El monitoreo constante permite detectar y corregir cualquier problema de presión de manera oportuna (Fernández et al., 2020).

- Paso V: Mantenimiento y actualizaciones

Finalmente, es esencial establecer un programa de mantenimiento regular para los equipos de control de presión y realizar actualizaciones según sea necesario. El mantenimiento adecuado de los dispositivos asegura su buen funcionamiento y prolonga su vida útil, mientras que las actualizaciones permiten incorporar nuevas tecnologías y mejorar continuamente la eficiencia del sistema (García et al., 2019).

Un ejemplo de sectorización mediante este criterio se encuentra en Barcelona, España. Donde la empresa Aguas de Barcelona implementó un proyecto de sectorización por presión para mejorar la eficiencia de su red de distribución de agua. La ciudad, conocida por su topografía variada y densidad urbana, enfrentaba desafíos significativos en la gestión de la presión del agua. El proyecto involucró la instalación de válvulas de control de presión en puntos estratégicos de la

red, lo que permitió un ajuste preciso de la presión en diferentes sectores (Aguas de Barcelona, 2019).

En la Ciudad de México, la sectorización por presión fue adoptada como una solución para los complejos desafíos de su extensa y antigua red de distribución de agua. La ciudad, con una población de más de 20 millones de habitantes y una topografía compleja, enfrentaba problemas graves de pérdidas de agua y variaciones en la presión del suministro. Gracias a la implementación de este criterio se logró el control de presión en diferentes zonas, logrando reducir las pérdidas de agua y mejorar la calidad del servicio, beneficiando a sus habitantes (Aguilar et al., 2020).

3.2.5 Sectorización por potencia

El criterio de sectorización por potencia para redes de distribución de agua potable implica dividir la red en sectores, según la energía hidráulica que cada uno necesita para bombear y distribuir el agua a lo largo de la red con el fin de mantener un suministro constante del servicio. Este enfoque permite usar la energía de manera más eficiente y mejorar el rendimiento del sistema de distribución de agua (Pérez et al., 2021).

Uno de los beneficios de la sectorización por potencia es la optimización del uso de energía lo que reduce significativamente el consumo energético y los costos operativos, contribuyendo a la sostenibilidad de la red (García & Martínez, 2020). Dividir la red en sectores según sus necesidades de potencia permite a los operadores monitorear y controlar el flujo de agua y la presión con mayor precisión en cada área. Esto facilita la detección y corrección de problemas de manera más rápida y eficiente (López et al., 2019).

La metodología para aplicar el criterio de sectorización por potencia se divide en los siguientes pasos:

- Paso I: Análisis de la red

Inicialmente se debe realizar un análisis detallado de la red de distribución de agua existente. Esto incluye evaluar la infraestructura actual, identificar las áreas con problemas de presión y flujo. Además, se deben recopilar datos sobre la demanda de agua y el consumo energético en diferentes puntos de la red (Fernández et al., 2020).

- Paso II: Diseño de sectores

El diseño de sectores específicos se debe aplicar según las necesidades de potencia. Esto implica dividir la red en zonas que puedan ser gestionadas de manera independiente, considerando factores como la topografía, la demanda de agua y la capacidad de bombeo. Es fundamental determinar los puntos estratégicos para la instalación de dispositivos de control y medición (García & Martínez, 2020).

- Paso III: Instalación de equipos de control

El siguiente paso es instalar equipos de control y medición en los puntos clave. Esto implica colocar bombas de alta eficiencia, válvulas reguladoras de presión y medidores de flujo que den información en tiempo real sobre el uso de energía y la demanda de agua en cada sector. (Pérez et al., 2021).

- Paso IV: Monitoreo y ajustes

Tras la instalación de los equipos de control, se inicia una fase de monitoreo continuo. Es esencial revisar regularmente los datos recopilados para detectar cualquier anomalía en el flujo y la presión del agua, ya que podrían indicar problemas en el sistema. El uso de sistemas de información geográfica (SIG) y software especializado facilita el análisis y la visualización de estos datos, apoyando la toma de decisiones informadas (Fernández et al., 2020).

- Paso V: Intervención y mantenimiento

Basándose en los datos obtenidos del monitoreo, se deben planificar y ejecutar las intervenciones necesarias para reparar fugas y mejorar la infraestructura de la red. Asimismo, es crucial implementar un programa de mantenimiento preventivo para garantizar el correcto funcionamiento de los equipos y mantener la integridad de la red a largo plazo. (López et al., 2019).

En Madrid, España la sectorización por el criterio de potencia se implementó con el objetivo de mejorar la eficiencia y reducir las pérdidas en la red de distribución de agua. En el proyecto se instalaron un total de 15 bombas de alta eficiencia, estas bombas fueron seleccionadas y distribuidas estratégicamente en los doce sectores que componen la red de distribución para optimizar el flujo y la presión del agua en la red de distribución (González et al., 2019).

Otro ejemplo se encuentra en Santiago, Chile, donde se implementó la sectorización por potencia para abordar los desafíos de su extensa red de distribución de agua potable (RDAP), caracterizada por variaciones significativas en la demanda. La red se dividió en 15 sectores en los que se instalaron 20 bombas de alta eficiencia para garantizar un suministro constante y eficiente en todas las áreas de la ciudad (Aguilar et al., 2020).

3.3 Criterios de sectorización para la creación de áreas de medición por distritos (DMA)

Existen criterios para la sectorización o la creación de áreas de medición por distritos (DMA), desarrollados por el Centro de Investigación en la Industria del Agua de Reino Unido, enfocando su aplicabilidad en Estados Unidos (Sturm & Thornton, 2005).

Figura 19.

Criterios para la creación de áreas de medición por distrito (DMA).



Nota. La figura muestra los criterios para la sectorización propuestos por el Centro de Investigación en la Industria del Agua de Reino Unido (UKWIR). Fuente: Elaboración propia.

Existen diferentes criterios para sectorizar las redes de distribución de agua, no todos se basan en los anteriormente explicados, pues, algunos se centran en evaluaciones económicas, como mantener un equilibrio entre el costo de las obras de sectorización y la detección de fugas frente al ahorro de agua previsto. Otros tienen un enfoque comercial, dividiendo por zonas políticas o estratos socioeconómicos. Estas metodologías son las tradicionalmente usadas y en general, es difícil establecer un límite claro para la sectorización (Saldarriaga et al., 2008).

3.4 Metodologías de sectorización basadas en algoritmos

Con el acceso a las nuevas tecnologías se han desarrollado metodologías de sectorización de las RDAP basadas en algoritmos, la mayoría de éstas, se basan en algoritmos de aprendizaje no supervisado. Aunque cada una tiene diferentes objetivos de optimización, se pueden clasificar en tres categorías según cómo representen el sistema de distribución (Salguero, 2021):

- **Teoría de Grafos:** En este enfoque, el sistema se visualiza como un conjunto de vértices (o nudos) conectados por líneas (o tuberías), representando las relaciones entre los elementos del sistema.
- **Estructuras Comunitarias:** Este campo trata el sistema de distribución como una red compleja de individuos interconectados, con distintas intensidades de conexión entre pares de nodos.
- **Procesos Heurísticos:** Este grupo incluye metodologías que no encajan en las categorías anteriores. Se enfoca en la elaboración de principios, estrategias y reglas para encontrar soluciones a problemas específicos.

Estas categorías permiten abordar la optimización de sistemas de distribución de manera estructurada y efectiva (Salguero, 2021).

3.4.1 Teoría de grafos

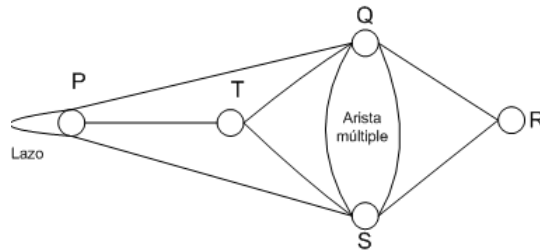
La teoría de grafos es una rama de las matemáticas que estudia las relaciones entre los elementos de un conjunto. Un grafo está compuesto por nodos (o vértices) y aristas (o enlaces) que conectan estos nodos. En términos de ingeniería, la teoría de grafos se utiliza para modelar y analizar redes complejas, como las redes de distribución de agua, donde los nodos representan elementos del sistema (como tanques, válvulas y consumidores) y las aristas representan las tuberías que conectan estos elementos (Gibbs, 2010).

Un grafo se representa comúnmente por $G = (V, A)$, donde $V = V(G)$ es el conjunto finito de vértices y $A = A(G)$ es el multiconjunto de pares no ordenados de vértices, denotados por $\{u, v\}$, que se denominan aristas. Si la arista $a = \{u, v\}$ relaciona los vértices u e v , se dice que u e v son vértices adyacentes y también que el vértice u (ó v) y la arista a son incidentes. A continuación, se describen algunas definiciones (Vegas, 2012):

- Se dice que dos vértices son adyacentes si están unidos por una arista.
- Se dice que dos aristas son adyacentes si tienen un vértice en común.
- Se dice que una arista y un vértice son incidentes si el vértice es extremo de la arista.
- Se dice que un vértice está aislado si no es adyacente a ningún otro vértice.
- Se llama bucle a toda arista de la forma $\{u, u\}$, es decir, a toda arista que une un vértice consigo mismo.
- Se llaman aristas múltiples a las aristas que aparecen repetidas en A (unen el mismo par de vértices).
- Se dice que un grafo es simple si no tiene bucles ni aristas múltiples.
- Un grafo que contiene bucles y/o aristas múltiples se llama multígrafo.

Figura 20.

Multígrafo.



Nota. La figura muestra el ejemplo de un multígrafo con cinco vértices, diez aristas; una de estas en bluce. Fuente: (Vegas, 2012).

Una característica distintiva de los grafos es la posibilidad de representarlos mediante tres estructuras de datos diferentes. La elección de una representación específica afectará los tiempos de ejecución de los algoritmos aplicados sobre el grafo, dependiendo del número de vértices y aristas. Por lo tanto, la selección de una representación adecuada dependerá de si el grafo es denso o disperso. Las formas comunes de representar un grafo incluyen la matriz de incidencia, la matriz de adyacencia y la lista de adyacencia (Vegas, 2012).

- Matriz de incidencia

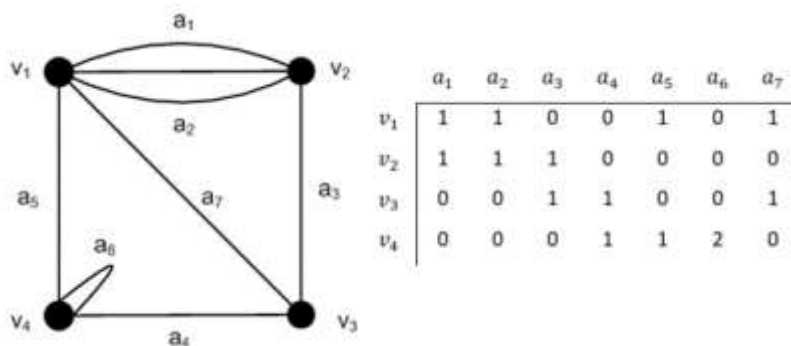
La matriz de incidencia es una forma de representación en la que las filas corresponden a los nodos y las columnas a las aristas del grafo. Esta matriz es particularmente útil para grafos dirigidos y permite identificar rápidamente las conexiones entre nodos y aristas. Cada entrada de la matriz indica la relación entre un nodo y una arista, utilizando valores de 1, -1 y 0 para representar la incidencia (Wilson, 1996).

A un grafo $G = (V, A)$ con v vértices y a aristas, siempre se le puede hacer corresponder una matriz $v \times a$ denominada Matriz de Incidencia de G . Si denotamos los vértices de G por $v_1, v_2, \dots, v_v$ y las aristas por $a_1, a_2, \dots, a_a$, entonces la Matriz de Incidencia de G es la matriz $M(G) =$

$[m_{ij}]$ donde m_{ij} es el número de veces que la arista a_j incide en el vértice v_i ; los valores son 0, 1 ó 2 (2 en el caso que la arista sea un bucle) (Vegas, 2012).

Figura 21.

Matriz de incidencia.



Nota. La figura muestra una matriz de incidencia de un grafo de cuatro nodos y siete conexiones. Fuente: (Vegas, 2012).

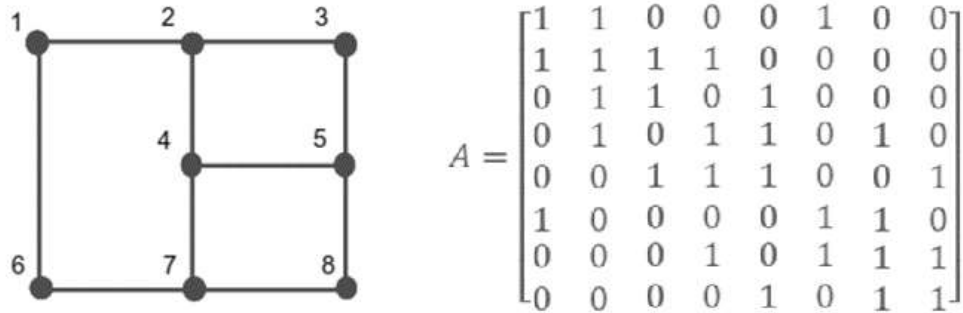
- Matriz de adyacencia

La matriz de adyacencia es otra estructura utilizada para representar grafos, en la cual tanto las filas como las columnas corresponden a nodos. La intersección de una fila y una columna contiene un valor que indica si existe una arista entre los dos nodos. Esta representación es eficiente para grafos densos, donde la mayoría de los nodos están conectados entre sí (Cormen et al., 2009).

Es la forma más comúnmente utilizada para la representación. Consiste en una tabla de tamaño $V \times V$, en la que $a[i][j]$ tendrá como valor 1 si existe una arista del nodo i al nodo j . En caso contrario, el valor será cero. Cuando se trata de grafos ponderados en lugar de 1 el valor que tomará será el peso de la arista. Si el grafo es no dirigido hay que asegurarse de que se marca con un 1 (o con el peso) tanto la entrada $a[i][j]$ como la entrada $a[j][i]$, puesto que se puede recorrer en ambos sentidos (Vegas, 2012).

Figura 22.

Matriz de adyacencia.



Nota. La figura muestra una matriz de adyacencia de un grafo de 8 nodos. Fuente: (Salguero, 2021).

- Lista de Adyacencia

La lista de adyacencia es una representación eficiente en términos de espacio, especialmente para grafos dispersos. En esta estructura, cada nodo tiene una lista asociada que contiene todos los nodos adyacentes a él. Esto facilita la iteración sobre los vecinos de un nodo sin necesidad de explorar toda la matriz (Diestel, 2017).

3.4.1.1 Aplicación de la teoría de grafos en la sectorización

Para el caso de aplicación de la teoría de grafos en la topología de redes de distribución sectorizadas se cuenta con varias aplicaciones, algunas se presentan a continuación:

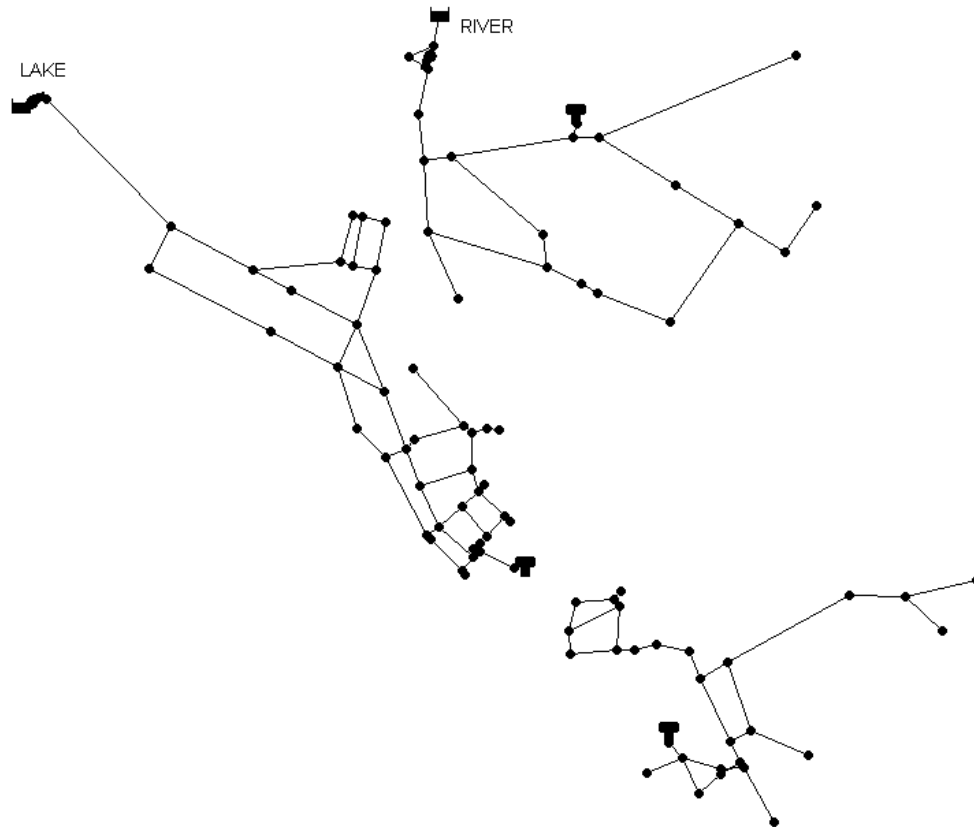
- Optimización de la ubicación de medidores de caudal: La ubicación óptima de medidores de caudal es crucial para el monitoreo eficiente del sistema de abastecimiento de agua. Los algoritmos topológicos pueden identificar las ubicaciones estratégicas donde estos medidores deben ser colocados para maximizar la precisión del monitoreo y minimizar costos (Gomes et al., 2016).

- Reducción del tamaño de la red, pasando de un modelo detallado a uno más compacto: Mediante técnicas de simplificación topológica, es posible reducir la complejidad de un modelo detallado de red de agua a uno más compacto y manejable. Esto facilita el análisis y la simulación del comportamiento del sistema sin perder precisión significativa en los resultados (Perelman & Ostfeld, 2011).
- Evaluación de la fiabilidad del sistema en operación: La fiabilidad de un sistema de abastecimiento de agua se refiere a su capacidad para operar sin fallos. Los algoritmos de red pueden evaluar la fiabilidad analizando la redundancia de caminos y la vulnerabilidad de componentes críticos, proporcionando métricas para mejorar la resiliencia del sistema (Yazdani & Jeffrey, 2011).
- Estimación de la capacidad de transporte de la red y detección de puntos críticos, como cuellos de botella en tuberías y nodos: El análisis topológico permite estimar la capacidad de transporte de la red y detectar puntos críticos que podrían limitar el flujo de agua, como cuellos de botella en tuberías y nodos. Identificar estos puntos es esencial para planificar mejoras y evitar problemas de suministro (Giustolisi et al., 2012).
- Análisis de cierres en casos de emergencia o rupturas de tuberías, incluida la generación de polígonos de corte: En situaciones de emergencia, como rupturas de tuberías, es crucial analizar y planificar cierres de red para minimizar el impacto en el suministro de agua. Los algoritmos topológicos pueden generar polígonos de corte para visualizar y gestionar eficientemente estos cierres (Creaco et al., 2016).
- Sectorización de redes según criterios específicos: La sectorización de redes implica dividir la red en sectores más pequeños para una gestión más eficiente. Los algoritmos topológicos pueden ayudar a definir estos sectores basándose en criterios específicos,

como la demanda de agua, la presión en las tuberías o la estructura geográfica, mejorando la eficiencia operativa y la detección de fugas (Di Nardo et al., 2013).

Figura 23.

Red de abastecimiento dividida en grafos.



Nota: En la figura se muestra la sectorización de una red de distribución dividida en tres grafos.

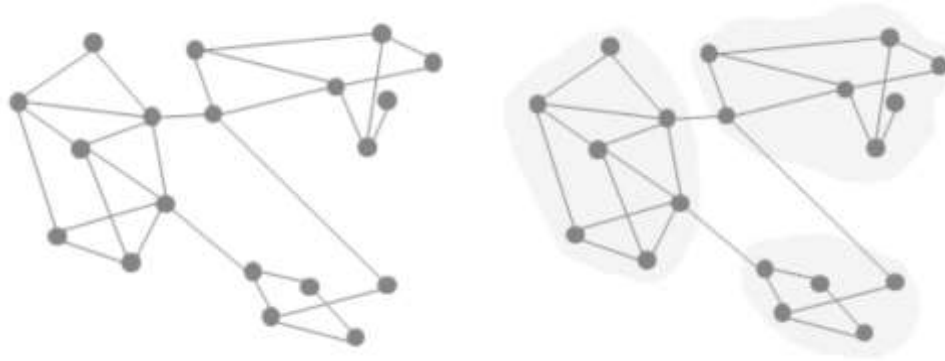
Fuente: (Vegas, 2012).

3.4.2 Estructuras comunitarias

Las estructuras comunitarias se refieren a la organización de una red en subgrupos o comunidades que presentan una alta densidad de conexiones internas y relativamente pocas conexiones con otros subgrupos. En el contexto de la sectorización de redes de acueducto, estas estructuras comunitarias se utilizan para mejorar la gestión, la eficiencia y la seguridad del sistema (Salguero, 2021).

Figura 24.

Estructuras comunitarias.



Nota. La figura muestra una estructura comunitaria (izquierda) formada por 3 comunidades (derecha). Fuente: (Salguero, 2021).

La identificación de estructuras comunitarias en redes de acueducto implica el uso de algoritmos de detección de comunidades que dividen la red en sectores más manejables. Estos algoritmos buscan maximizar la modularidad de la red, lo que permite identificar regiones donde los nodos y las tuberías están más densamente interconectados entre sí que con el resto de la red (Newman, 2006). Esta partición facilita la gestión local de la red y permite una rápida respuesta a problemas como fugas o contaminaciones.

La modularidad mide la fuerza de agrupación o conexión que existe dentro de una estructura comunitaria. Matemáticamente, se define por la ecuación (Salguero, 2021):

$$Q = \sum_{i=1}^c (e_{ii} - a_i^2)$$

donde:

Q : Modularidad de la estructura comunitaria.

a_i : Elemento de la matriz de adyacencia que representa la conexión entre los vértices i y j .

c : Número de comunidades.

e_{ii} : representa la parte de aristas que conectan dos vértices de la misma comunidad, siendo un valor elevado si se tienen comunidades bien delimitadas.

Un valor alto de modularidad indica que la red presenta comunidades bien definidas y separadas entre sí. Por otro lado, un valor bajo de modularidad sugiere que la red no tiene una estructura comunitaria clara.

Además del modularidad, el concepto de "fracción de aristas intracomunitaria" también se utiliza para caracterizar las estructuras comunitarias. Esta fracción se define como la proporción de aristas que conectan vértices pertenecientes a la misma comunidad. Se calcula mediante la ecuación:

$$a_i = \sum_{i=1}^c e_{ij}$$

Los sistemas de distribución de agua pueden ser modelados como estructuras comunitarias, donde los puntos de consumo actúan como elementos de la comunidad. Estos puntos están interconectados por tuberías, cuya robustez de conexión varía en función de la distribución de la infraestructura hidráulica. Esta perspectiva de una red de agua potable como una estructura comunitaria ha sido explorada por diversos investigadores, motivados por la necesidad de simplificar la red para facilitar su análisis y gestión (Salguero, 2021).

3.4.2.1 Aplicación de las estructuras comunitarias en la sectorización

Para la aplicación de las estructuras comunitarias, (Diao et al., 2013) proponen una metodología que agrupa todos los elementos de la red en diferentes sectores, con el objetivo de maximizar la modularidad del sistema en su totalidad, utilizando la siguiente expresión:

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{ij} \left[a_{ij} - \frac{k_i * k_j}{2m} \right] * \delta(C_i, C_j)$$

Donde:

a_{ij} : es el elemento ij de la matriz.

m : El número total de tuberías.

k_{ij} : Corresponde con el nodo i o j , o el número de líneas que inciden en el nodo.

$\delta(C_i, C_j)$: toma el valor de 1 si los nudos i y j pertenecen a la misma comunidad y 0 si pertenecen a otra.

Después de plantear la agrupación, y calcular el valor de la modulación, se seleccionan qué tuberías se cerrarán para delimitar los sectores y corroborar su funcionamiento hidráulico (Salguero, 2021).

Siguiendo la metodología mencionada anteriormente, (Scibetta et al., 2014) proponen un método para identificar rápidamente las fronteras de los sectores utilizando un algoritmo. Este algoritmo mueve los nudos entre distintos sectores y evalúa la modularidad del sistema, incorporando en sus cálculos tanto la dirección como la cantidad de flujo que pasa por las tuberías. De este modo, los autores aplican la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{1}{W} \sum_{ij} \left[w_{ij} - \frac{S_i^{out} * S_j^{in}}{2m} \right] * \delta(C_i, C_j)$$

Donde:

w_{ij} : Es el peso que une los nodos i y j , considerado como caudal circulante.

W : Es la suma de todos los caudales circulantes.

m : El número total de tuberías.

$S_i^{out} = \sum_j w_{ij}$: Corresponden a la suma de los caudales salientes del nodo i .

$S_j^{in} = \sum_i w_{ij}$: Corresponden a la suma de los caudales entrantes al nodo j .

$\delta(C_i, C_j)$: toma el valor de 1 si los nudos i y j pertenecen a la misma comunidad y 0 si pertenecen a otra. (Salguero, 2021).

Por último, (Giustolisi & Ridolfi, 2014) presentan una metodología multipropósito para garantizar una óptima sectorización, en donde se busca maximizar la modularidad y minimizar el costo asociado al cierre de las tuberías para aislar los sectores, según las siguientes ecuaciones:

$$\max(Q) = \max \left[1 - \frac{n_c}{n_p} - \sum_{m=1}^{n_m} \left(\sum_{k=1}^{n_p} \frac{(w_p)_k * \delta(M_m, M_k)}{W} \right)^2 \right]$$

$$\text{Min}(\text{cost}) = \min \left(\sum_{j=1}^{n_d} c_j \right)$$

Donde:

n_c : número de tuberías de conexión entre sectores.

n_p : número de líneas.

n_m : número de sectores.

Wp : el peso de la línea (según los autores, la longitud de las tuberías).

Mk : módulo al que pertenece la línea k.

δ : tomará el valor de 1 si Mm y Mk son iguales y 0 en caso contrario.

W : es la suma de todos los pesos.

n_d : número de nuevos elementos a instalar.

3.4.3 Procesos heurísticos

Cuando se enfrenta un problema que se desea analizar, la heurística tiene como objetivo desarrollar principios o estrategias que ayuden a encontrar la solución más eficaz y eficiente, especialmente cuando es difícil hallar una solución óptima o satisfactoria. Dentro del conjunto de procesos heurísticos y refiriéndonos nuevamente a la técnica de sectorización, se incluyen todas aquellas metodologías que no encajan ni en la teoría de grafos ni en las estructuras comunitarias (Salguero, 2021). Los procesos heurísticos actúan como atajos mentales usados para resolver

problemas de manera rápida, sin embargo, no se tiene la certeza de que sean la mejor solución posible. Este enfoque se apoya en experiencias pasadas, reglas prácticas o simplemente en la intuición para tomar decisiones cuando no se tiene toda la información necesaria para la solución de una incógnita o cuando se presentan condiciones bajo presión de tiempo (Gigerenzer & Gaissmaier, 2011). Los heurísticos se emplean tanto en situaciones cotidianas como en contextos más técnicos, como la inteligencia artificial y la optimización computacional. En el campo de la inteligencia artificial, los algoritmos heurísticos se utilizan para buscar soluciones aproximadas a problemas complejos que pueden incluir múltiples variables y restricciones (Russell & Norvig, 2020).

(Di Nardo & Di Natale, 2010) presentan un enfoque para identificar configuraciones de sectores que sean eficientes en términos de costos. Este enfoque ayuda a los diseñadores a definir sectores mediante la comparación de múltiples opciones. Los pasos propuestos son los siguientes:

1. Simulación Inicial: Realizar una simulación de la red de distribución de agua potable (RDAP) para obtener el caudal en las tuberías y la altura piezométrica en los nodos.
2. Definición de Matrices: Establecer una matriz de adyacencia, una matriz de incidencia y una matriz de pesos para el grafo que representa la red.
3. Cálculo de Caminos: Calcular los caminos más cortos desde la fuente hasta cada nodo y determinar la frecuencia con que cada tubería aparece en todos los caminos. Eliminar las tuberías con frecuencia nula. El resultado será un esquema principal de la red.
4. Transformación en Grafo: Convertir el esquema principal en un grafo.
5. Selección de Sectores: Determinar el número de sectores y sus dimensiones.
6. Inserción de UOC: Insertar Unidades de Operación y Control (UOC).
7. Colocación de Válvulas: Ubicar válvulas para aislar los sectores.

8. Simulación del Nuevo Esquema: Realizar una nueva simulación de la red con el esquema modificado.
9. Evaluación de Alternativas: Evaluar la alternativa utilizando índices de eficiencia energética. Si la evaluación no es satisfactoria, se replantea el paso 5. Si la evaluación es satisfactoria, se elimina una UOC y se verifica si los índices de eficiencia energética se mantienen dentro de los rangos aceptables. El objetivo es lograr una configuración con el mínimo número de UOC posible.

3.5 Ejemplos de sectorización basados en algoritmos

Los ejemplos nos permiten entender de manera más rápida y sencilla un tema. A continuación, se muestra la explicación de la sectorización basada en algoritmos:

3.5.1 Herramienta de ayuda a la sectorización de redes de abastecimiento de agua basadas en la teoría de grafos aplicando diferentes criterios.

Para la metodología de diseño planteada el autor Oscar Vegas Niño, en su proyecto “Herramienta de ayuda a la sectorización de redes de abastecimiento de agua basadas en la teoría de grafos aplicando diferentes criterios”, se utiliza la herramienta de sectorización SIG GISRED desarrollada por el grupo REDISHP del Instituto del Agua y Medioambiente (IIAMA) en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Concebida como una extensión de ArcView 3.2, esta herramienta integra el programa EPANET 2.0 dentro del entorno SIG. Su objetivo es construir modelos de redes hidráulicas a presión directamente desde un SIG y analizar los resultados en el mismo entorno, eliminando las complejas conexiones necesarias con otras aplicaciones (REDHISP, 2011).

Para simular el comportamiento de la red, GISRED genera un archivo con los datos de entrada necesarios para el simulador y utiliza el módulo de herramientas (toolkit) de EPANET 2.0. El

simulador proporciona un conjunto de resultados que la aplicación almacena en su base de datos para consultas futuras. La herramienta de sectorización descrita en este trabajo emplea la teoría de grafos para dividir la red en sectores, los cuales pueden ser sectores aislados o cascadas de sectores (Campbell, 2013).

Dentro de la metodología propuesta por (Vegas, 2012), se presentan las fases previas a la creación de un DMA:

Figura 25.

Fases previas a la creación de un DMA.



Nota. La figura muestra las siete fases previas a la creación de los DMA propuestas en el ejemplo. Fuente: (Vegas, 2012). Modificación realizada por el autor.

- Desarrollo de la herramienta: La herramienta ha sido codificada en Visual Basic 6.0 y enlazada con la librería externa de EPANET (Epanet2.dll - Módulo de Herramientas de EPANET). Esta integración permite utilizar funcionalidades de EPANET para obtener información relevante de la red, como la dirección de flujo de los caudales y otras propiedades hidráulicas necesarias para la sectorización (Vegas, 2012).
- Creación de árboles dirigidos: La herramienta utiliza algoritmos basados en la teoría de grafos para generar árboles dirigidos de mínimo coste penalizados por el sentido del flujo que circula por las tuberías. Estos árboles representan la estructura de la red sectorizada, identificando las conexiones entre los diferentes sectores y las fuentes de suministro (Vegas, 2012).
- Consideración de múltiples fuentes: La herramienta tiene en cuenta el número de fuentes que intervienen en el suministro de agua a las ciudades. Esto es importante para determinar la contribución de cada fuente al consumo en los diferentes sectores y garantizar un suministro equitativo y eficiente en toda la red (Vegas, 2012).
- Optimización de la sectorización: La herramienta busca crear sectores de manera óptima, considerando no solo la conectividad de la red, sino también aspectos como la dirección de flujo, la distribución de caudales y la ubicación de válvulas de corte. Esto permite lograr una sectorización efectiva que facilite el control y la gestión de la red de distribución de agua (Vegas, 2012).

La metodología de este ejemplo se dividió en los siguientes pasos (Vegas, 2012):

- Paso I: Cargar la información de la red en una estructura de datos

Para el caso de estudio el autor tomo una red que cuenta con doce nodos, diecisiete tramos de tubería y dos fuentes de abastecimiento, las características de la red se muestran a continuación:

Tabla 2.

Características de la red de distribución de agua.

Resumen (TUBERÍAS)		
Número total de tuberías	17	
Rango de diámetros (mm)	[400-200]	
Longitud total (m)	1700	

Resumen (NUDOS DE CAUDAL)		
Número nudos de caudal	12	
Desnivel Máximo (m)	40	
Desnivel Mínimo (m)	25	

Resumen (EMBALSES)		
Cota (m)	[E1-E2]	50

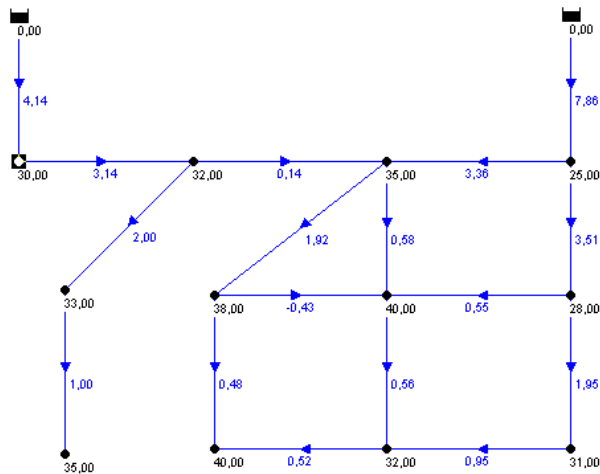
Nota. La tabla muestra la informacion de entrada definida por el autor. Fuente: (Vegas, 2012).

Modificación realizada por el autor.

Una vez ingresadas las características iniciales, se procede a digitalizar el esquema de la red en el programa EPANET (Vegas, 2012).

Figura 26.

Esquema de la RDAP.



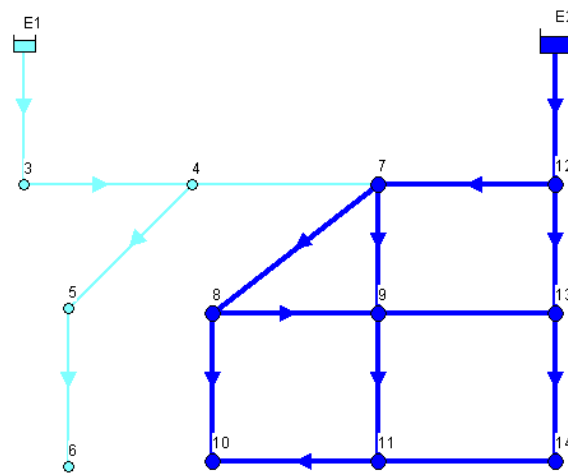
Nota. La figura muestra el esquema de la red, donde se evidencia el sentido del flujo de la tubería (representado por las flechas de color azul). Además, los valores de caudal (valores en color negro) y presión (valores en color azul). Fuente: (Vegas, 2012).

- Paso II: Identificar los macrosectores a partir de las fuentes de abastecimiento

Se realiza la identificación de los macrosectores de la red de estudio, donde se establece el Embalse 1 con cuatro nodos y el Embalse 2 con ocho nodos. Para esto se tiene en cuenta el porcentaje de contribución de las fuentes de abastecimiento con respecto al consumo proyectado (Vegas, 2012).

Figura 27.

Red de distribución de agua.

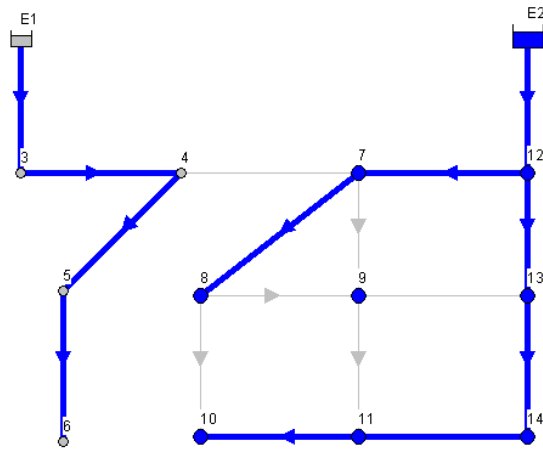


Nota. La figura muestra la separación de tuberías y nodos, en función del porcentaje de contribución de las fuentes con respecto al consumo de cada nodo. Fuente: (Vegas, 2012).

- Paso III: Identificar la red matriz a partir de cada fuente

La red matriz debe ser continua hasta que no cumpla con el valor del tamaño de tubería fijada como dato de entrada (diámetro tubería > 200 mm).

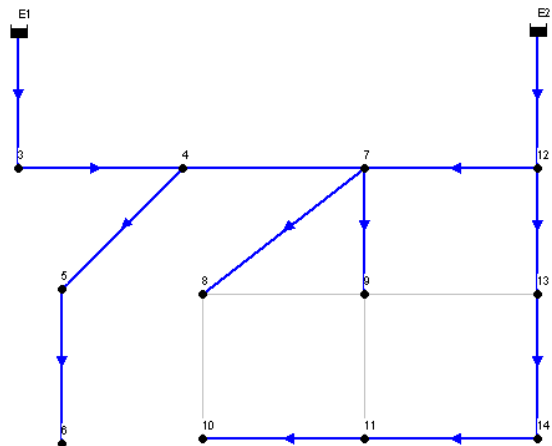
Red matriz-arterial.



Nota. La figura muestra la identificación de la red arterial desde cada fuente (representada en la imagen por las tuberías de mayor espesor). Fuente: (Vegas, 2012).

- Paso IV: Construir los árboles dirigidos de mínimo coste e identificar las líneas de acceso a cada nodo.

Árbol dirigido.



Nota. La figura muestra el árbol dirigido de mínimo coste, teniendo como valor asociado a las líneas el caudal. Fuente: (Vegas, 2012).

- Paso V: Orden topológico de la red

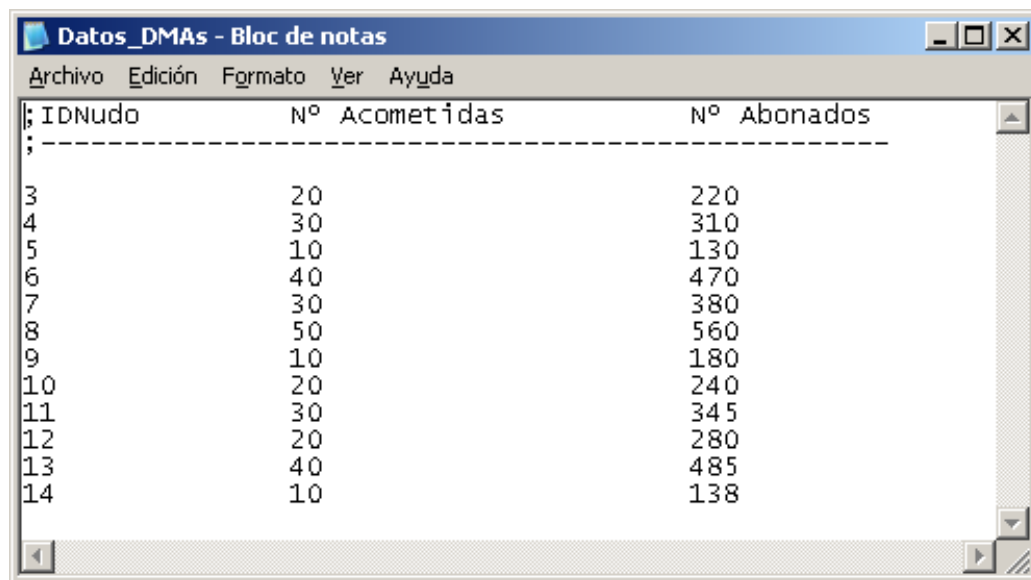
Se procede a la ordenación topológica de los nodos para ir ascendiendo desde los nodos con grado de conectividad uno, hasta la fuente de suministro. Al mismo tiempo se van acumulando en los nodos o líneas el valor relacionado según el criterio de sectorización elegido (Vegas, 2012).

- Paso VI: Conjunto de corte de cada rama

El algoritmo identificará en qué tuberías (ramas) se deben instalar los caudalímetros y en qué cuerdas se deben colocar las válvulas de corte para aislar las DMA. Si una rama no tiene un conjunto de corte, solo se instalarán caudalímetros. Las figuras siguientes presentan los resultados obtenidos de todo el proceso (Vegas, 2012).

Figura 30.

Ramas de la RDAP.

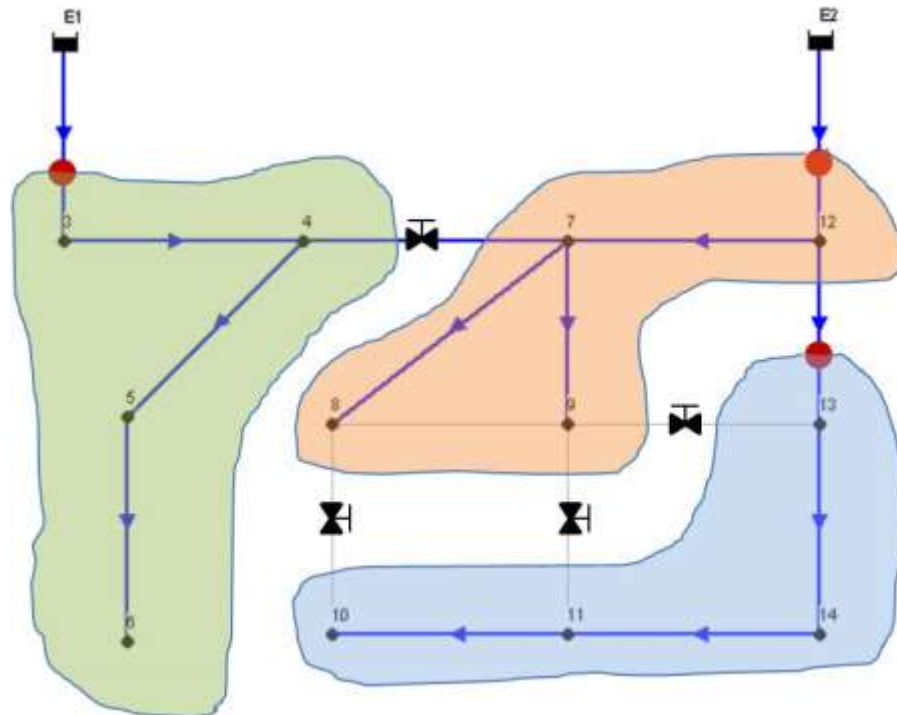


IDNudo	Nº Acometidas	Nº Abonados
3	20	220
4	30	310
5	10	130
6	40	470
7	30	380
8	50	560
9	10	180
10	20	240
11	30	345
12	20	280
13	40	485
14	10	138

Nota. Fichero de texto con el número de acometidas y abonados asociados a los nudos de caudal. Fuente: (Vegas, 2012).

Se crean los sectores y las áreas de distritos de medición, teniendo en cuenta la ubicación de accesorios como caudalímetros y válvulas de corte.

Áreas de distritos de medición.



Finalmente, se realiza un análisis de las presiones, caudales y velocidades en la red antes y después de la sectorización para generar un análisis de los resultados obtenidos y evaluar su eficiencia operacional. (Vegas, 2012)

Tabla 3.

Presiones en los nodos de la red de estudio.

CON EMBALSES		
ID	Sin sectorizar	Sectorizada
Nudo	Presión (m)	Presión (m)
Nudo 3	30	30
Nudo 4	32	32
Nudo 5	33	33
Nudo 6	35	35
Nudo 7	35	35
Nudo 8	38	38
Nudo 9	40	40
Nudo 10	40	40
Nudo 11	32	32
Nudo 12	25	25
Nudo 13	28	28
Nudo 14	31	31

Nota. La tabla muestra la comparación de los datos de presión en una red no sectorizada y una red sectorizada. Fuente: (Vegas, 2012).

Tabla 4.

Caudales y presiones de las tuberías.

ID	Sin Sectorizar	Sectorizado	Sin Sectorizar	Sectorizado
Tubería	Caudal(lps)		Velocidad (m/s)	
Tubería 1	4,14	4	0,04	0,04
Tubería 2	3,14	3	0,04	0,04
Tubería 3	2	2	0,03	0,03
Tubería 4	1	1	0,02	0,02
Tubería 5	0,14	0	0	0
Tubería 6	1,92	1,46	0,02	0,02
Tubería 7	0,58	0,54	0,02	0,02
Tubería 8	0,43	0,46	0,01	0,01
Tubería 9	0,48	0	0,02	0
Tubería 10	3,36	3	0,03	0,03
Tubería 11	7,86	8	0,06	0,06
Tubería 12	3,51	4	0,04	0,04
Tubería 13	0,55	0	0,02	0
Tubería 14	1,95	3	0,02	0,03
Tubería 15	0,95	2	0,01	0,03
Tubería 16	0,56	0	0,01	0
Tubería 17	0,52	1	0,01	0,01

Nota. La tabla muestra los datos de caudal y presión de la red sin sectorizar en comparación con los datos de la red sectorizada. Fuente: (Vegas, 2012).

Las presiones en los nudos de la red ya sectorizada son igual a las presiones de la red original, esto se debe a que el caudal aportado desde el depósito E1 (Sector 1) al Sector 2 es bajo (0,14 l/s), con respecto a las demandas en todos los nudos cuyo valor es de 1 l/s. Ese 0,14 l/s deberá ser proporcionado por el embalse E2 para asegurar la demanda del sector 2. Los sentidos de los flujos no cambiarán al cerrar tuberías; en consecuencia, habrá una variación en la magnitud de los caudales que circulan por las tuberías que permanecen abiertas para distribuir el agua a todos los nodos con consumo (Vegas, 2012).

3.5.2 Método de sectorización basada en la detección de comunidades mediante caminos aleatorios

Este método de sectorización es uno de los propuestos en la tesis doctoral “Sectorización de redes de abastecimiento de agua potable basada en detección de comunidades en redes sociales y optimización heurística” de Enrique Campbell. Para definir esta metodología se realiza una descripción de los caminos aleatorios, el algoritmo de Walktrap y un ejemplo de aplicación de la metodología (Campbell, 2017).

En el ámbito de las matemáticas y la teoría de probabilidad, los caminos aleatorios se definen como procesos estocásticos en los que la posición de una partícula en un instante específico depende únicamente de su posición en el instante anterior y de una variable aleatoria que determina su dirección siguiente y la longitud del paso. Un camino aleatorio puede modelarse matemáticamente mediante la ecuación (Campbell, 2017):

$$X(t + \tau) = X(t) + \Phi(\tau)$$

En esta ecuación, Φ representa una variable aleatoria que describe la ley de probabilidad para tomar el siguiente paso y τ es el intervalo de tiempo entre pasos consecutivos. Dado que la longitud y dirección de un paso dado dependen únicamente de la posición $X(t)$ y no de posiciones

anteriores, se dice que el camino aleatorio tiene la propiedad de Markov, también conocida como la propiedad de la Cadena de Markov. Está es un sistema en tiempo discreto que cambia de estado en cada instante entre un conjunto finito de estados y en cada momento, el cambio de un estado a otro depende de un conjunto de probabilidades determinadas (Campbell, 2017).

La matriz de transición es una matriz cuadrada cuyos elementos son las probabilidades de transición de un estado a otro:

$$P_{x,y} = [X_1 = y \mid X_0 = x]$$

Esta matriz está identificada por el hecho de que todas sus filas suman 1. La misma se rellena siguiendo las reglas que se presentan en la siguiente ecuación.

$$P_{ij} = P(X_{k+1} = j \mid X_k = i) = \begin{cases} \frac{1}{d(i)}, & \text{si } ij \in E \\ 0, & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

donde $d(i)$ corresponde al grado del nodo i .

El Algoritmo Walktrap es una técnica utilizada en la teoría de grafos y análisis de redes para detectar comunidades en redes complejas. Este algoritmo se basa en la idea de que los nodos dentro de la misma comunidad tienen una mayor probabilidad de estar conectados entre sí a través de caminos aleatorios. En otras palabras, los caminos aleatorios que comienzan en un nodo dentro de una comunidad tienden a permanecer dentro de esa comunidad por un periodo más largo antes de salir a otros nodos en diferentes comunidades (Pons & Latapy, 2005).

Si sobre un grafo dado se ejecutan caminos aleatorios, la información en la matriz de probabilidad o matriz P relativa a las probabilidades P_{ij}^k de ir desde un nodo i a un nodo j en K pasos, es lo suficientemente grande como para obtener suficiente información sobre la topología de la red (Campbell, 2017).

En este algoritmo computa una medida de distancia r_{ij} entre nodos y comunidades basada en la matriz P descrita, expresada en las siguientes ecuaciones:

$$r_{ij}(t) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (P_{ik}^t - P_{jk}^t)^2}{d(k)}}$$

$$r_{c_1 c_2} = \sqrt{\sum_{k=1}^n \frac{(P_{c_1 k}^t - P_{c_2 k}^t)^2}{d(k)}}$$

$d(k)$ representa el grado de k .

Esta distancia se utiliza para obtener la matriz de disimilaridad de todo el grafo. Basándose en comparaciones por parejas en esta matriz, se forma la primera comunidad. Para determinar qué comunidades fusionar, se emplea el método Ward. En este método, las medias de las distancias al cuadrado entre nodos en cada sector se definen como la función objetivo y el objetivo es minimizarlas (Campbell, 2017).

$$\sigma_k = \frac{1}{n} \sum_{C \in \mathcal{P}_k} \sum_{i \in C} r_{iC}^2$$

Donde: $\mathcal{P}_k$ corresponde a una partición k y r_i corresponde a la distancia descrita en las anteriores ecuaciones.

A cada paso, el algoritmo forma una nueva partición que minimiza $\Delta\sigma$, de manera tal que al final no hay una única partición, sino una secuencia de particiones a diferentes niveles. A partir de este conjunto de particiones, se puede seleccionar la que mejor se ajuste a los requisitos. Para este propósito, los autores proponen la Tasa de Incremento (n_c , Increase Ratio), que calcula la fracción representada por Δ_{σ_k} de una partición dada en relación a la partición previa $\Delta_{\sigma_{k-1}}$. Esta tasa se evalúa para todos los niveles del dendrograma. El nivel con el valor más alto de n_c se define como la partición que mejor captura la estructura de la comunidad (Pons & Latapy, 2005).

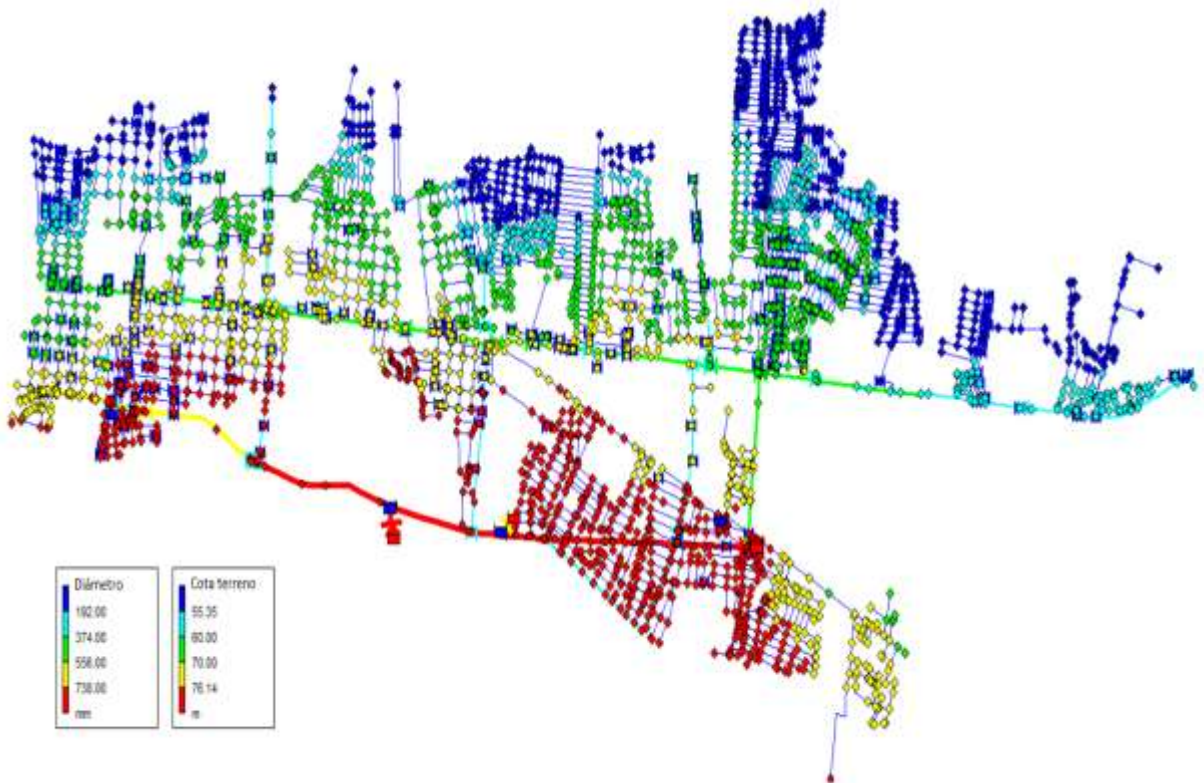
$$n_c = \frac{\Delta \sigma_k}{\Delta \sigma_{k-1}}$$

El algoritmo Walktrap presenta varias ventajas en comparación con otros algoritmos de detección de comunidades. Una de las principales ventajas es la medida de distancia descrita anteriormente, que cuenta con un cálculo fácil (Campbell, 2017).

- Para la aplicación del método se toma como base una red de distribución con las características mostradas en la siguiente figura.

Figura 32.

Diámetros y cotas de la red utilizada como ejemplo.

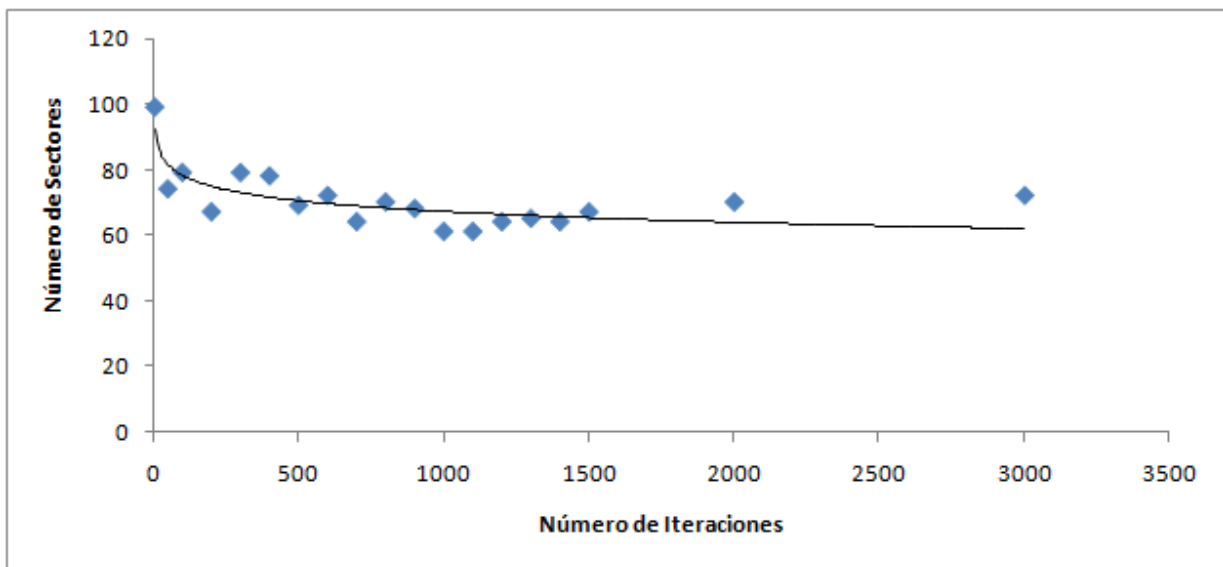


Nota. En la figura se muestra la vista en planta de la red de distribución de ejemplo y se muestran los rangos de diámetros y cotas de terreno representando los rangos en colores definidos. Fuente: (Campbell, 2017).

- Es de esperar mayor calidad en los resultados en la medida que se incrementa el número de pasos en la implementación. Para comprobar esto, se registró el número de particiones en la que se maximiza el valor de modularidad para distintos números de iteraciones y se verificó la cantidad de comunidades identificadas por el algoritmo lo que se resume en la siguiente figura (Campbell, 2017).

Figura 33.

Número de sectores generados por el algoritmo Walktrap mediante distintos números de Iteraciones.

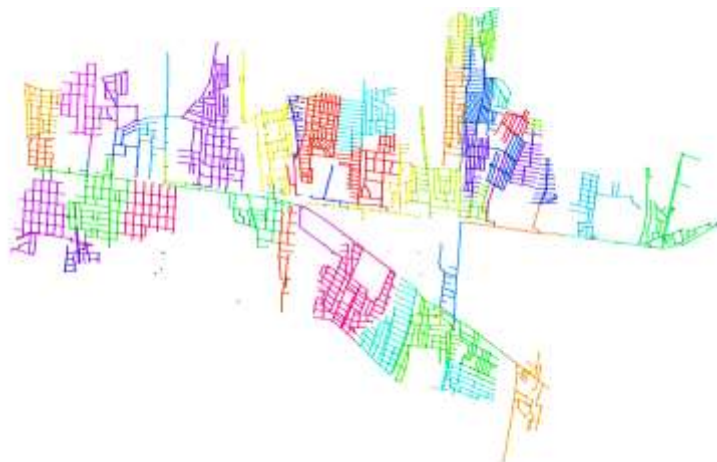


Nota. La figura muestra la gráfica con los puntos de dispersión de los resultados obtenidos por el algoritmo Walktrap, se evidencia que cuando aumenta el número de iteraciones el número de comunidades se mantiene entre 60 y 70. Fuente: (Campbell, 2017).

- Por lo anterior, la cantidad de sectores no garantiza igualdad topológica, aunque sí bastante similitud. Se muestran dos particiones en 65 comunidades, empleando en uno de los casos unas 200 iteraciones y en otro 1500 (Campbell, 2017).

Figura 34.

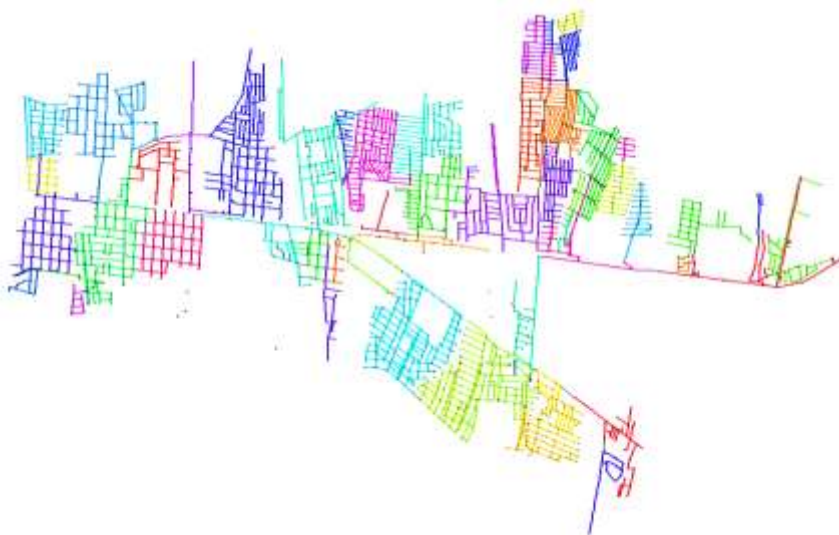
Partición obtenida usando 200 iteraciones.



Nota: Se presentan las 65 comunidades establecidas con 200 iteraciones. Fuente: (Campbell, 2017).

Figura 35.

Partición obtenida usando 1500 iteraciones.



Nota: En la figura se presentan las 65 comunidades establecidas con 1500 iteraciones. Fuente: (Campbell, 2017).

- Como resultado se observa que, para la partición obtenida con 1500 iteraciones, las comunidades se encuentran bien diferenciadas unas respecto a las otras. En el primer caso, se evidencia cómo algunos de los nodos de algunas comunidades quedan rodeados por nodos pertenecientes a otras comunidades. Basado en esto, se opta por continuar el ejemplo con una partición en 65 comunidades empleando 1500 iteraciones. Lo anterior también puede ser respaldado mediante el valor de modularidad obtenido para ambas particiones: en el primero de los casos, se obtuvo un valor de 0.85, en tanto que en el segundo caso se obtuvo un valor de 0.97 (Campbell, 2017).
- Haciendo uso del proceso de “re-fusión” empleando el criterio de longitud de tubería de sectores como en el rango de 30 km a 3 km, se obtuvieron 10 sectores en total.

Figura 36.

Sectores generados utilizando criterio de longitud de tubería (30-3Km).

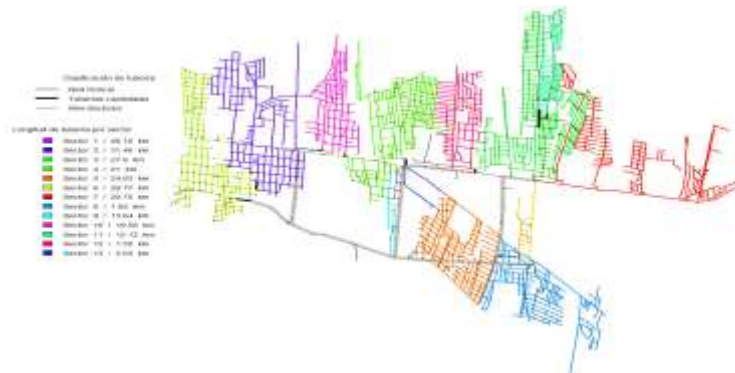


Nota: En la figura se muestran los diez sectores definidos con un rango entre 30 – 3km. Adicionalmente se observa el trazado de la red matriz, tuberías para ubicación de elementos de corte y sectores. Fuente: (Campbell, 2017).

- Se ajusta el criterio reduciendo la restricción como longitud mínima de sectores a 1.5 km, esto ocasiona el aumentó a 13 sectores.

Figura 37.

Sectores generados utilizando criterio de longitud de tubería (30-1.5Km).

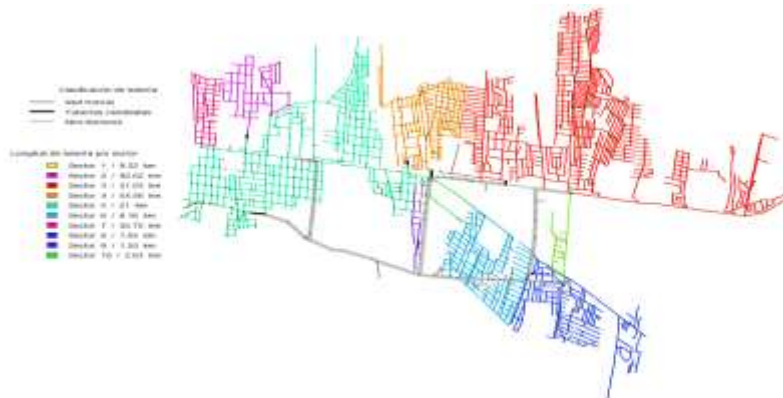


Nota: En la figura se muestran los trece sectores definidos con un rango mínimo de 1.5km. Adicionalmente se observa el trazado de la red matriz, tuberías para ubicación de elementos de corte y sectores. Fuente: (Campbell, 2017).

- Al cambiar el criterio de longitud de tubería a cota del terreno para la definición de las comunidades, se reduce el número de sectores a 10 nuevamente.

Figura 38.

Sectores generados tras el criterio de cota de terreno.

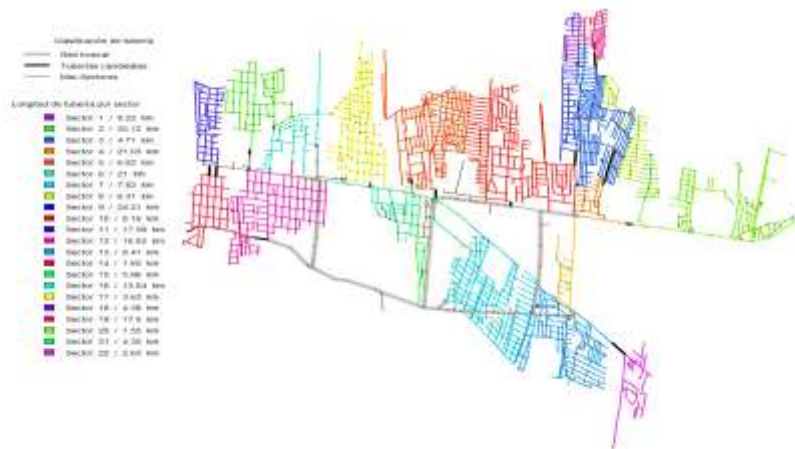


Nota: En la figura se muestran los diez sectores definidos teniendo en cuenta el criterio de cota del terreno. Adicionalmente se observa el trazado de la red matriz, tuberías para ubicación de elementos de corte y sectores. Fuente: (Campbell, 2017).

- Por último, al restringir el criterio de cota del terreno a 5m, el número de sectores aumenta de 10 a 22.

Figura 39.

Sectores generados tras el criterio de cota de terreno restringido a 5m.



Nota: En la figura se muestran los diez sectores definidos teniendo en cuenta el criterio de cota del terreno. Adicionalmente se observa el trazado de la red matriz, tuberías para ubicación de elementos de corte y sectores. Fuente: (Campbell, 2017).

El método de definición de sectores basado en el algoritmo Walktrap ha demostrado ser completamente aplicable al problema de sectorización abordado en este ejemplo. Entre sus ventajas, se encuentra la capacidad de definir el número de iteraciones, lo cual permite mejorar el resultado final de la definición de sectores. Tal como se mostró en el ejemplo de implementación, aunque después de cierto rango el número de iteraciones deja de afectar significativamente el número de sectores en los que se maximiza el valor de modularidad, sí puede influir en la topología de las comunidades obtenidas. En el ejemplo, se observa que cuando se generan comunidades con un menor número de iteraciones, algunas tuberías pertenecientes a ciertas comunidades se encuentran dentro del área de otras comunidades (Campbell, 2017).

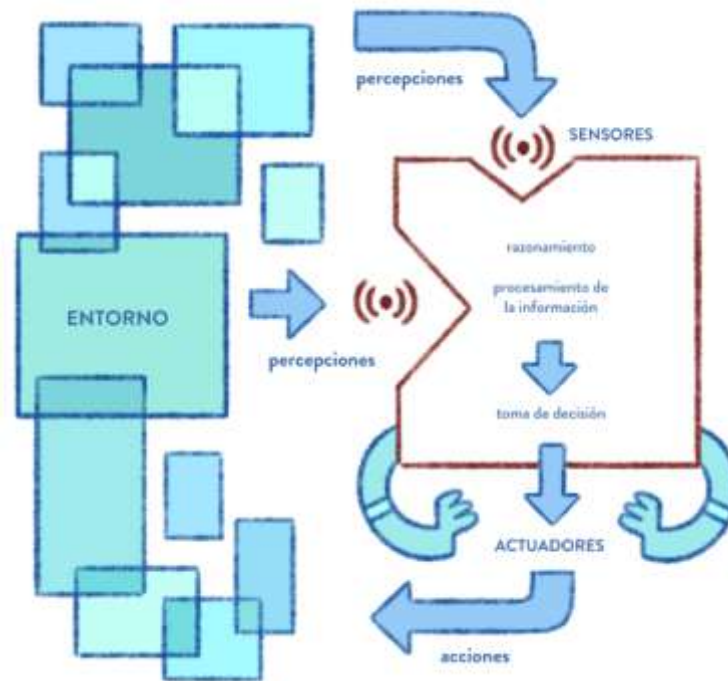
La sectorización de las redes de distribución de agua potable (RDAP) es un tema de gran interés debido a sus numerosas ventajas, las cuales impactan directamente a la calidad del servicio recibido por los consumidores. Los criterios de sectorización son diversos y no se puede afirmar que existen metodologías universales, ya que estos criterios varían según la ubicación y las condiciones iniciales de la red de distribución a sectorizar. Ante esta realidad, surge la necesidad de optimizar el proceso de sectorización de una RDAP. Dado que la humanidad está al comienzo de una nueva era tecnológica, es el momento de aplicar estos avances, como el uso de la inteligencia artificial y las redes neuronales en la sectorización de redes de distribución de agua potable.

Capítulo IV. Inteligencia artificial y redes neuronales.

La inteligencia artificial (IA) es una herramienta clave en la transformación digital por la que atraviesa la humanidad, su capacidad para automatizar funciones cognitivas humanas permite comprender y resolver problemas de manera rápida y eficaz. Estas tareas son llevadas a cabo mediante algoritmos y modelos computacionales que permiten a las máquinas procesar grandes cantidades de datos y tomar decisiones basadas en patrones y experiencias previas (Russell & Norving, 2016) .

Figura 40.

La inteligencia artificial como sistema informático.



Nota. La figura muestra la IA como sistema informático que actúa para resolver de forma óptima un objetivo en función de los datos percibidos de su entorno. Fuente: Inteligencia Artificial y Tecnologías Digitales para los ODS (2021).

La inteligencia artificial abarca diversas áreas de nuestra vida, haciéndola más sencilla en muchos aspectos. En el ámbito laboral, las tecnologías de IA pueden analizar grandes cantidades de datos de manera rápida y precisa. Esto libera a los profesionales de tareas repetitivas, permitiéndoles enfocarse en trabajos más creativos y estratégicos (Brynjolfsson & McAfee, 2014).

4.1 Redes neuronales

Las redes neuronales son sistemas informáticos que se inspiran en el funcionamiento del cerebro humano, con el objetivo de procesar información de una manera similar a las neuronas biológicas. Estas redes consisten en un conjunto de nodos o neuronas artificiales, organizados en capas que están interconectadas mediante enlaces ponderados (Goodfellow et al., 2014).

4.1.1 Historia de las redes neuronales

La historia de las redes neuronales inicia en el año 1943, cuando el neurofisiólogo Warren McCulloch y el matemático Walter Pitts propusieron el primer modelo matemático de una neurona artificial. Su modelo, conocido como la neurona de McCulloch-Pitts. Este modelo fue diseñado para imitar el comportamiento de las neuronas biológicas utilizando una combinación de entradas binarias y una función de activación simple (McCulloch & Pitts, 1943).

El funcionamiento de la neurona de McCulloch-Pitts se basa en la suma ponderada de sus entradas. Si esta suma supera un umbral predeterminado, la neurona se activa y produce una salida de 1; de lo contrario, la salida es 0. Este mecanismo es conocido como función de activación de umbral y permite que la neurona realice operaciones lógicas básicas. Una característica importante del modelo propuesto por McCulloch y Pitts es su capacidad para ser configurada en redes más complejas. Al conectar múltiples neuronas de esta forma, es posible construir circuitos lógicos que pueden realizar cálculos más avanzados y procesar información de manera más sofisticada. Este concepto de interconexión de neuronas sentó las bases para el desarrollo de redes neuronales

más complejas y eventualmente para el campo del aprendizaje automático y la inteligencia artificial (McCulloch & Pitts, 1943).

Durante la década de 1950, el psicólogo Frank Rosenblatt desarrolló el perceptrón, una de las primeras implementaciones prácticas de redes neuronales artificiales. Inspirado por los principios del funcionamiento del cerebro humano, Rosenblatt concibió el perceptrón como un modelo computacional capaz de aprender a partir de ejemplos. El perceptrón básico consiste en una sola capa de neuronas y está diseñado para abordar problemas en los que las clases son linealmente separables. Una característica fundamental del perceptrón es su capacidad de aprendizaje a través de un algoritmo de ajuste de pesos. Durante el entrenamiento, el perceptrón ajusta sus pesos en función de los errores cometidos en las predicciones. Si la predicción es incorrecta, los pesos se actualizan para reducir el error en futuras predicciones. Este proceso se repite iterativamente hasta que el perceptrón alcanza un nivel aceptable de precisión en la clasificación de los datos de entrenamiento. Este algoritmo de aprendizaje es conocido como la regla de aprendizaje del perceptrón (Rosenblatt, 1958).

A pesar de su éxito inicial, el perceptrón enfrentó críticas importantes debido a sus limitaciones. En 1969, Marvin Minsky y Seymour Papert publicaron el libro "Perceptrons", donde demostraron que el perceptrón de una sola capa no podía manejar problemas de clasificación no lineales. Esta revelación llevó a una disminución en el interés y la financiación para la investigación en redes neuronales durante varios años (Minsky & Papert, 1969).

El resurgimiento de las redes neuronales tomó fuerza en la década de 1980 gracias a la introducción del algoritmo de backpropagation (retropropagación), desarrollado por David Rumelhart, Geoffrey Hinton y Ronald Williams. Este innovador algoritmo hizo posible entrenar redes neuronales con múltiples capas, también conocidas como redes neuronales profundas,

superando así las limitaciones señaladas por Minsky y Papert años antes. La retropropagación se transformó en una técnica esencial para el avance de modelos de aprendizaje profundo, marcando un hito en la evolución de la inteligencia artificial (Rumelhart et al., 1986).

En las décadas siguientes, las redes neuronales han seguido avanzando gracias al aumento en la capacidad de procesamiento de las computadoras y la disponibilidad de grandes cantidades de datos. Desde aproximadamente 2010, las redes neuronales profundas han comenzado a destacarse en áreas como el reconocimiento de voz, la visión por computadora y el procesamiento del lenguaje natural, convirtiéndose en una tecnología clave en el campo de la inteligencia artificial actual (LeCun et al., 2015).

En la actualidad, las redes neuronales continúan siendo un área de investigación vibrante, con avances constantes en arquitecturas como redes convolucionales, redes recurrentes y redes generativas adversariales. Estos desarrollos están ampliando continuamente los límites de lo que podemos lograr en inteligencia artificial y aprendizaje automático (Goodfellow et al., 2016).

Figura 41.

Historia y avances importantes de las redes neuronales artificiales.



Nota. La figura muestra una línea de tiempo de los avances más destacados de las redes neuronales artificiales. Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Clasificación de las redes neuronales artificiales

Las redes neuronales artificiales (RNA) se pueden clasificar en diferentes categorías basadas en su arquitectura, el tipo de aprendizaje que emplean y sus aplicaciones específicas.

Según su arquitectura las redes neuronales se pueden clasificar en:

Perceptrones: El perceptrón es la forma más sencilla de la red neuronal, consistente en una sola capa de neuronas. Esta forma fue creada por Frank Rosenblatt en 1958, el perceptrón es capaz de resolver problemas de clasificación linealmente separables (Rosenblatt, 1958). Su desventaja es su capacidad limitada debido a que solo puede resolver problemas lineales.

Redes Neuronales de Múltiples Capas (MLP): Las redes neuronales de múltiples capas (MLP) consisten en una capa de entrada, una o más capas ocultas y una capa de salida. Estas redes utilizan el algoritmo de retropropagación para entrenarse, lo que les permite aprender funciones no lineales complejas (Rumelhart et al., 1986). Estos tipos de redes neuronales son las más utilizadas en problemas de clasificación y regresión.

Redes Neuronales Convolucionales (CNN): Este tipo de redes están diseñadas específicamente para procesar datos con estructura de rejilla, como imágenes. Introducidas por Yann LeCun, las CNN utilizan capas convolucionales para extraer características locales y reducir la dimensionalidad de los datos (LeCun et al., 1998). Su mayor ventaja es la efectividad para desarrollar tareas de reconocimiento de imágenes y procesamiento de video.

Redes Neuronales Recurrentes (RNN): Estas redes son adecuadas para secuencias de datos, como series temporales o texto. Las RNN tienen conexiones cíclicas que permiten retener información de entradas anteriores, lo cual es crucial para tareas de predicción de series temporales y procesamiento del lenguaje natural (Elman, 1990). La gran limitación de este tipo de redes es su incapacidad de memoria a largo plazo lo que puede complicar su uso.

Redes de Memoria a Largo Plazo y Corto Plazo (LSTM): Estas redes son una variación de las RNN diseñadas para superar el problema de recordar datos a largo plazo. Introducidas por Hochreiter y Schmidhuber en 1997, las LSTM utilizan celdas de memoria que pueden retener información durante largos periodos, lo que las hace ideales para tareas de larga dependencia temporal (Hochreiter & Schmidhuber, 1997).

Redes Generativas Antagónicas (GAN): Este tipo de redes trabaja con dos redes neuronales que compiten entre sí: una red generadora que crea datos falsos y una red discriminadora que intenta distinguir entre datos reales y falsos. Introducidas por Ian Goodfellow en 2014, las GAN han demostrado ser extremadamente efectivas en la generación de imágenes realistas y otros tipos de datos sintéticos (Goodfellow et al., 2014)

Las redes neuronales son formadas por una capa de entrada, una o más capas ocultas y una capa de salida. La capa de entrada recibe los datos iniciales, las capas ocultas procesan la información a través de operaciones matemáticas y la capa de salida produce el resultado final. Cada conexión entre neuronas tiene un peso asociado que se ajusta durante el proceso de entrenamiento para minimizar el error en las predicciones (LeCun et al., 2015).

El funcionamiento de una red neuronal se basa en dos tipos de aprendizaje supervisado o no supervisado. El aprendizaje supervisado, entrena a la red utilizando un conjunto de datos etiquetados, ajustando los pesos de las conexiones para que las predicciones de la red se acerquen lo más posible a los valores reales bajando significativamente el margen de error. En el aprendizaje no supervisado, la red intenta identificar patrones y estructuras en los datos sin la guía de etiquetas específicas (Schmidhuber, 2015).

La capacidad de las redes neuronales para aprender y generalizar a partir de grandes volúmenes de datos las hace particularmente efectivas en tareas donde los algoritmos tradicionales fallan

(Krizhevsky et al., 2012) permiten que el uso de estas se pueda ver aplicado en diferentes áreas. Por ejemplo, se utilizan en el reconocimiento de voz y de imágenes, en la traducción automática, en la predicción de series temporales, diagnóstico médico, entre otras.

Una ventaja que destaca entre las redes neuronales es su capacidad para modelar relaciones complejas y no lineales y su adaptabilidad a diferentes tipos de datos. Sin embargo, este sistema informático también tiene limitaciones, como la necesidad de grandes cantidades de datos para entrenarse adecuadamente, el alto costo computacional asociado a su entrenamiento y la dificultad para interpretar sus decisiones debido a su naturaleza de "caja negra" (Zhang et al., 2018)

4.1.3 Aplicación de las redes neuronales a la sectorización de agua potable

Las redes neuronales han demostrado ser muy efectivas en la gestión de las redes de distribución de agua potable, ayudando a optimizar su operación y administración. Un uso clave de esta tecnología es la predicción del consumo de agua. Al analizar datos históricos y patrones de consumo, las redes neuronales pueden anticipar la demanda futura, lo que facilita una mejor planificación y eficiencia en la distribución (Adamowski & Karapataki, 2010).

Además, las redes neuronales son muy útiles para detectar fugas y pérdidas de agua en las redes de distribución. Gracias a los datos proporcionados por sensores y medidores inteligentes, estas redes pueden identificar anomalías en el flujo de agua que podrían indicar la presencia de fugas, lo que permite una intervención rápida y precisa en el punto donde se registra la irregularidad (Mounce et al., 2011).

Otra aplicación importante es la optimización del control de presión en las redes de agua potable. Las redes neuronales pueden ajustar válvulas y bombas para mantener la presión adecuada en diferentes partes de la red, lo que reduce significativamente el riesgo de roturas y mejora la eficiencia energética del sistema (Wu et al., 2010).

Finalmente, las redes neuronales también juegan un papel crucial en la gestión de la calidad del agua. Pues este tipo de tecnología permite analizar datos en tiempo real y predecir posibles eventos de contaminación, lo que permite a las autoridades tomar medidas preventivas y asegurar que el suministro de agua potable sea seguro (Zhang et al., 2018).

4.2 Ejemplos de aplicación de redes neuronales a la sectorización de agua potable

En el proceso evolutivo del diseño ingenieril, se han empleado analogías con el funcionamiento de órganos y sistemas del cuerpo humano. Este enfoque busca simular la complejidad de estos sistemas biológicos para abordar las situaciones que surgen en los diseños hidráulicos (Montes, 2017). A continuación, se mostrarán ejemplos de aplicación de redes neuronales artificiales a la sectorización de redes de distribución de agua potable:

4.2.1 Cálculo hidráulico de redes de distribución de agua potable utilizando redes neuronales

En su tesis de maestría en ingeniería civil Juan Camilo Montes Álvarez, desarrollo una red neuronal cuya arquitectura permitió realizar el cálculo y modelación de redes de distribución de agua potable (RDAP) por medio del software MATLAB®, aplicándolo a la red matriz de Bogotá (Montes, 2017). El proceso se realizó de la siguiente manera:

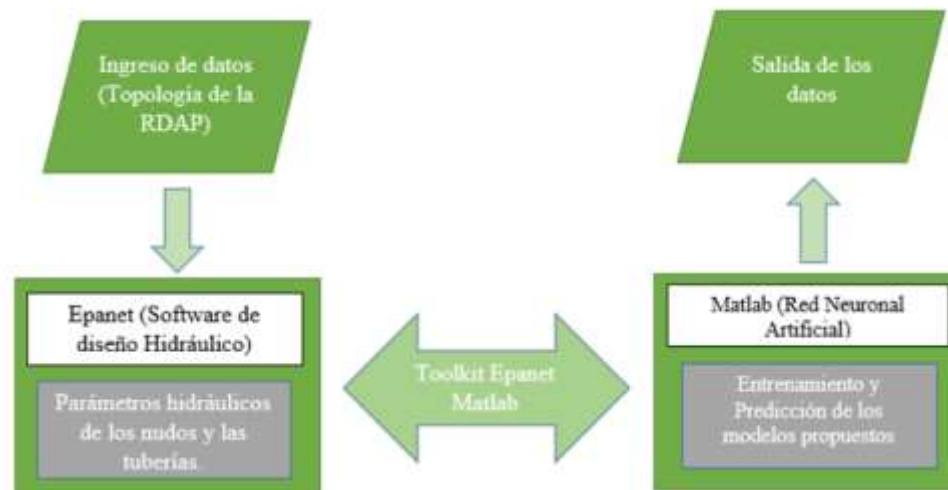
- El proceso inicio con la determinación del tipo de Red Neuronal Artificial (RNA), aplicable para la simulación de una RDAP (Red de distribución de agua potable), junto con el algoritmo de entrenamiento que se debe aplicar para la evaluación de este tipo de simulaciones en tiempo extendido. Eligiendo como simulador hidráulico el programa Epanet, el cual permite los cálculos hidráulicos para la red de distribución de agua potable. El programa elegido para el desarrollo de las RNA fue Matlab® gracias a que presenta una interfaz de fácil comprensión, además de manuales de ayuda y tutoriales

que permiten desarrollar cualquier tipo de modelo. Sin embargo, la necesidad de una herramienta que permitiese trabajar en un solo entorno aprovechando las funcionalidades de Epanet y MatLab® lo llevo a la elección del software Toolkit (Montes, 2017).

- Seguidamente definió la topología de una RNA, por medio del software MatLab®, para el entrenamiento de una red patrón, con las variables topológicas e hidráulicas definidas, para la evaluación de RDAP. Obteniendo veinte modelos de redes neuronales (Montes, 2017). La metodología usada para este proceso de muestra en la siguiente figura:

Figura 42.

Metodología de Implementación del modelo de RNA en Matlab.



Nota. La figura muestra la metodología para la determinación del desempeño de las RNA en el estudio de las RDAP. Fuente: (Montes, 2017).

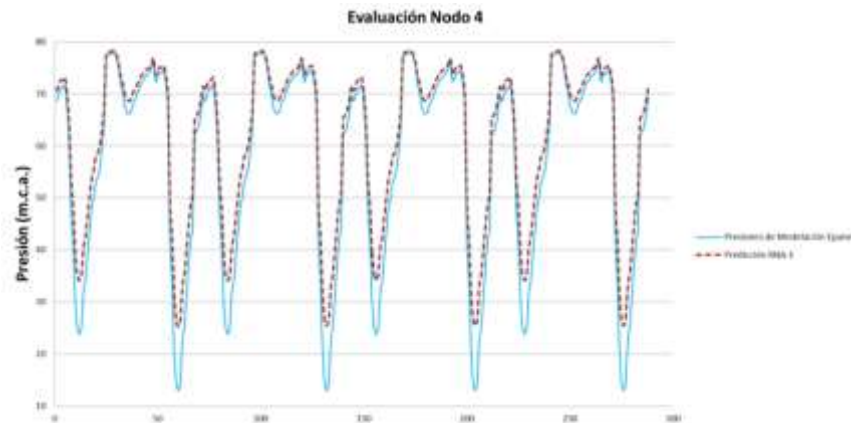
- El siguiente paso fue la estimación del número de capas ocultas que mejor se adaptaran al comportamiento de una RDAP para simulaciones en tiempo real. El ejercicio se

realizó asumiendo entre 1 y 2 capas ocultas, debido a que presentaban el mejor desempeño (Montes, 2017).

- La evaluación del desempeño de las RNA en la obtención de las curvas de presión en una RDAP y la aplicación a la red Matriz de Bogotá. Permitted conocer que las redes estudiadas en general tienen una excelente correlación entre los datos, sin embargo, el desempeño total varía sustancialmente y se vuelve un factor determinante, además del desfase de las presiones. Por lo que a pesar de haber tenido buenos resultados el autor recomendó la evaluación de otros métodos de entrenamiento y el ajuste de las variables topológicas para ampliar el campo de posibilidades que generan incertidumbre lo que ayudará a la convergencia de los datos (Montes, 2017).

Figura 43.

Predicción del comportamiento en el nudo 4.



Nota. La figura muestra la predicción de la RNA 1 y las presiones de modelación del software Epanet evaluando el nodo 4, siendo la predicción con mayor desfase. Fuente: (Montes, 2017).

- La evaluación del desempeño de las RNA en la obtención de las curvas de velocidad en una RDAP y la aplicación a la red Matriz de Bogotá. Este análisis fue limitado por los accesorios presentes en la red Matriz de Bogotá, especialmente las válvulas reguladoras

de presión y válvulas de corte. Lo que causo que al simular las redes a nivel hidráulico en Epanet se observen tuberías cuyas velocidades son muy cercanas a cero distorsionando los resultados que se obtenidos para la red neuronal artificial (Montes, 2017).

- Finalmente, la estimación de la utilidad de las RNA, obtenidas por medio de MatLab®, para la simulación de eventos en tiempo extendido, así como el tiempo de modelación comparados con el software de Epanet, permitió concluir que no es aplicable para la Red Matriz de Bogotá, en caso de que los accesorios presentes en la red y las restricciones de diseño limiten las velocidades de las tuberías y existan tramos donde la velocidad se reduzca a valores cercanos a cero. Sin embargo, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la etapa predictiva de las RNA, es importante destacar que su aplicabilidad es para sistemas existentes en operación y eventualmente mantenimiento (Montes, 2017).

4.2.2 Red neuronal de grafos para la partición integrada de la red de agua y las áreas de medición dinámica del distrito

Esta investigación realizada por Minglei Fu, Kezhen Rong, Yangyang Huang, Ming Zhang, Lejing Zheng, Jianfeng Zheng, Mayadah W. Falah y Zaher Mundher Yaseen sobre introduce un nuevo método que se centra en la aplicación de una red neuronal gráfica para analizar la estructura de la red de distribución de agua, identificando patrones complejos y dividiendo eficientemente la red en áreas de medición distrital (DMA). Esta aproximación innovadora busca mejorar la eficiencia operativa, la resiliencia y la capacidad de respuesta ante emergencias en las redes de distribución de agua potable (Fu et al., 2022).

El uso de esta tecnología permite analizar y dividir la red de distribución de agua en secciones más manejables de manera eficiente. Gracias a la red neuronal gráfica, se podría modelar la estructura de la red de agua y detectar patrones complejos que impactan negativamente en la gestión del sistema. Con este enfoque, se logra una partición más precisa y adaptable de la red en áreas de medición de distritos dinámicos, lo que facilita una mejor supervisión y control del flujo de agua en tiempo real. Además, la red neuronal gráfica permite identificar de manera más eficaz posibles problemas o emergencias en la red, facilitando una respuesta rápida y eficiente ante situaciones críticas (Fu et al., 2022).

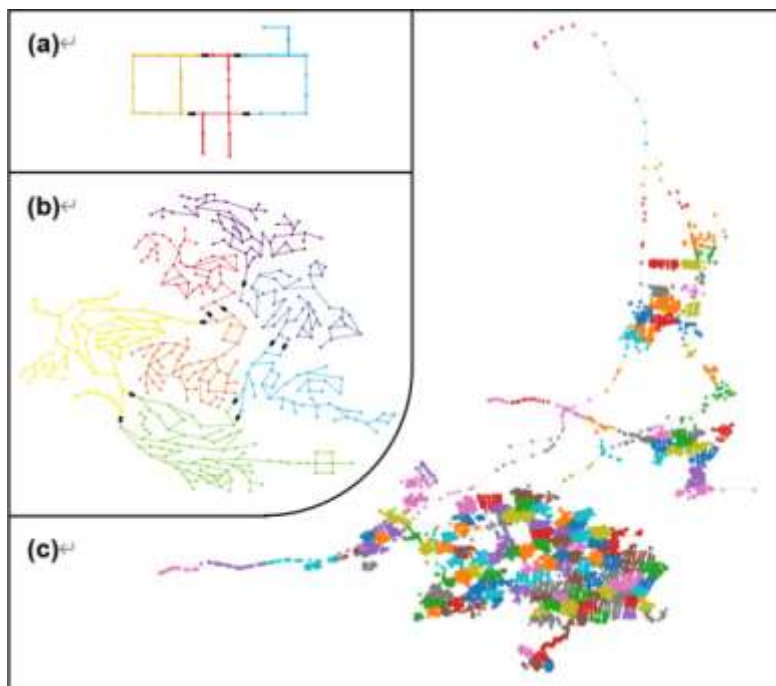
Las ventajas encontradas al implementar el método propuesto son:

- Reducción de fugas: Al dividir la red de distribución de agua en DMA más pequeñas y controlables, se facilita la detección y reparación de fugas, lo que ayuda a reducir las pérdidas de agua en el sistema (Fu et al., 2022).
- Monitoreo de contaminantes: Las DMA permiten un monitoreo más efectivo de la calidad del agua, lo que ayuda a identificar y abordar posibles problemas de contaminación en áreas específicas de la red (Fu et al., 2022).
- Optimización de la gestión de presión: La división en DMA facilita la optimización de la presión del agua en diferentes partes del sistema, lo que puede mejorar la eficiencia operativa y reducir el riesgo de daños en las tuberías (Fu et al., 2022).
- Respuesta a emergencias: Las DMA dinámicas ofrecen una mayor flexibilidad y capacidad de respuesta en situaciones de emergencia, permitiendo una gestión más eficaz de eventos inesperados como roturas de tuberías o interrupciones en el suministro de agua (Fu et al., 2022).

El estudio de caso práctico que probó la efectividad del método propuesto para la partición de redes de agua y áreas de medición de sectores dinámicos se basó en un sistema de distribución de agua simulado llamado C-town, se desarrolló un marco de trabajo integrado que combinaba la partición de redes de agua y DMA dinámicos utilizando PyTorch, una biblioteca de aprendizaje automático (Fu et al., 2022). La red de distribución de agua C-Town es un modelo hipotético ampliamente utilizado en investigaciones y competencias de calibración de redes hidráulicas (Ostfeld et al., 2012). Este modelo fue desarrollado para la "Battle of the Water Calibration Networks" (Batalla de las Redes de Calibración del Agua), proporcionando un entorno complejo y realista para probar métodos de calibración y detección de fugas en sistemas de distribución de agua (Savic et al., 2014).

Figura 44.

La estructura de la red de distribución de agua C-Town.



Nota. La figura muestra en la parte (a) La red de agua de Hanoi, (b) La red de agua de C-Town y (c) La red de agua de E-Town. Fuente: (Fu et al., 2022).

En este estudio, se utilizaron indicadores generales, como el índice I_r , para verificar la racionalidad de la partición de la red. Se comparó el rendimiento hidráulico de las DMA dinámicas con el de las DMA fijas, evaluando el impacto de diferentes parámetros del modelo en la partición de la red de agua. Los resultados de la simulación demostraron que la partición de la red de agua utilizando una red neuronal gráfica proporcionó una solución excelente, interpretable y rápida. Además, se encontró que las DMA dinámicas tenían un rendimiento hidráulico mucho mejor que las DMA fijas en situaciones de emergencia, mostrando una mayor resiliencia y estabilidad. El estudio también identificó la necesidad de abordar el problema de la interactividad entre DMA, especialmente cuando están conectadas en un bucle, para mejorar la eficiencia de las operaciones dinámicas de las fronteras en situaciones de emergencia (Fu et al., 2022).

En conclusión, el estudio de caso práctico demostró la eficacia del método propuesto para la gestión de sistemas de distribución de agua mediante la combinación de partición de redes de agua y DMA dinámicos, destacando sus beneficios en términos de rendimiento hidráulico, resiliencia y capacidad de respuesta ante emergencias (Fu et al., 2022).

Conclusiones

Las redes de distribución de agua son elementos fundamentales en un sistema de acueducto, debido a que son las encargadas de garantizar la entrega eficiente y sostenible de agua potable a los usuarios. El diseño adecuado y las propuestas de mantenimiento regulares son esenciales para minimizar pérdidas generadas por diferentes factores y asegurar la calidad del agua. La gestión de una RDAP enfrenta desafíos significativos, como la detección y reparación de fugas, la presión adecuada en toda la red y la necesidad de actualizar infraestructuras antiguas.

La sectorización es un método que divide la red de distribución en distritos hidráulicos manejables, permitiendo un control y monitoreo más preciso, facilitando una gestión eficiente del recurso. Existen diversos criterios de sectorización que ofrecen distintos enfoques complementarios para dividir la red en sectores más manejables. La combinación de estos criterios, desde enfoques geográficos hasta metodologías basadas en algoritmos avanzados, proporciona una amplia gama de opciones para mejorar la gestión de redes de distribución de agua potable.

Sin embargo, la elección de los criterios de sectorización no puede hacerse de manera arbitraria, ni se puede aplicar un único criterio a todas las redes de distribución de agua potable. La sectorización puede basarse en límites naturales, utilizando los elementos geográficos presentes, o en criterios de presión, que se fundamentan en características topográficas. También puede considerarse el criterio económico, donde los recursos disponibles se gestionan para optimizar el funcionamiento de la red.

La elección del criterio para sectorizar debe basarse en la información específica de la red, su ubicación, tamaño y capacidad. Esta distribución permite una respuesta más rápida y eficiente a problemas específicos en distintas áreas de la red. Pues, al seleccionar el criterio adecuado para

cada contexto específico, se puede optimizar el rendimiento hidráulico, reducir las pérdidas de agua no contabilizadas y minimizar los tiempos de interrupción del servicio. Una sectorización efectiva y sostenible es crucial para garantizar el suministro continuo de agua potable de calidad a todos los ciudadanos, contribuyendo al desarrollo socioeconómico y al bienestar de las comunidades a nivel local, nacional e internacional.

El uso de las herramientas tecnológicas en estos sistemas se presenta de manera innovadora, las metodologías basadas en algoritmos, como la teoría de grafos, las estructuras comunitarias y los procesos heurísticos, ofrecen enfoques estructurados y efectivos para la optimización de sistemas de distribución de agua. La aplicación de redes neuronales puede mejorar significativamente la sectorización y operación de estas infraestructuras, ya que permite predecir y detectar problemas en la red de distribución con alta precisión, mejorando la eficiencia operativa del sistema. Además, se pueden optimizar los patrones de distribución de agua, ajustando remotamente las presiones y los flujos según la demanda, lo que contribuye a una operación más sostenible, permitiendo la planificación de las reparaciones y evitando fallos mayores, lo que reduce costos y mejora la fiabilidad de la red de distribución.

Teniendo en cuenta los ejemplos expuestos en esta monografía, el autor puede recomendar un estudio detallado para evaluar los diferentes criterios de sectorización con el fin de seleccionar el criterio que mejor cumpla con las necesidades y factores específicos de la red de distribución de agua potable. Una elección incorrecta del criterio de sectorización puede repercutir negativamente en el funcionamiento final de la red, afectando la eficiencia y calidad del servicio.

Es crucial reconocer que la selección adecuada del criterio de sectorización puede tener un impacto significativo en la comunidad. Un criterio bien elegido no solo mejora la operatividad de la red, sino que también contribuye al bienestar de la población al asegurar un suministro

constante. Por otro lado, una decisión equivocada puede llevar a problemas operativos, interrupciones del servicio y descontento entre los usuarios. Además, un mal resultado del proyecto afecta considerablemente la reputación de la empresa encargada de la ejecución del proyecto, pues, la confianza de la comunidad se ve comprometida, lo que puede tener consecuencias a largo plazo para futuras iniciativas y proyectos.

El éxito de cualquier proyecto o mejora constructiva se basa en una planificación y gestión meticulosa. Por lo tanto, se recomienda enfáticamente llevar a cabo un análisis exhaustivo que considere todos los factores relevantes, como la topografía, las condiciones hidráulicas, la distribución de la población y los recursos económicos disponibles. Involucrar a expertos y utilizar tecnologías avanzadas para simular y evaluar diferentes escenarios puede proporcionar una visión más clara y ayudar a tomar decisiones informadas. Finalmente, es importante establecer un proceso de monitoreo y evaluación continua para ajustar y optimizar la sectorización según sea necesario, garantizando así la sostenibilidad y eficiencia a largo plazo de la red de distribución de agua potable.

Referencias

- Acueductos de Nazca: construcción preincaica en Perú. (2020). Arquitectura. <https://arquitecturayempresa.es/noticia/acueductos-de-nazca-construccion-preincaica-en-peru>
- Adamowski, J., & Karapataki, C. (2010). Comparison of multivariate regression and artificial neural networks for peak urban water-demand forecasting: Evaluation of different ANN learning algorithms. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(10), 729-743.
- Aguas de Barcelona. (2019). Informe anual de gestión. Aguas de Barcelona.
- Aguas de Madrid. (2019). Informe anual de gestión. Aguas de Madrid.
- Aguilar, R., Martínez, J., & Torres, L. (2020). Gestión de redes de agua en ciudades metropolitanas. *Revista de Ingeniería Hidráulica*, 34(2), 123-137.
- Aguirre, M. (2004). Los acueductos prehispánicos en Mesoamérica. *Arqueología Mexicana*, 12(68), 42-49.
- Aldana, M. (2010). Los acueductos de Nazca: Un sistema hidráulico milenario en el desierto peruano. *Arqueología*, 18(2), 125-140.
- Alegre, H., Baptista, J. M., Cabrera, E., Cubillo, F., Duarte, P., Hirner, W., Merkel, W., & Parena, R. (2006). *Performance Indicators for Water Supply Services*. IWA Publishing.
- American Society of Civil Engineers. (2020). *Hydraulic structures for water intake*.
- American Water Works Association. (2017). *Water treatment plant design* (5th ed.). McGraw-Hill Education
- Apostol, T. M. (2004). The Tunnel of Samos. *Engineering & Science*, 01. <https://calteches.library.caltech.edu/4106/1/Samos.pdf>
- Araujo, L. S., Ramos, H. M., & Coelho, S. T. (2006). Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management. *Water Resources Management*, 20(1), 133-149.

- Autoridad Nacional del Agua. (2011 s.f.). *Obras hidráulicas en la época colonial*.
<https://www.ana.gob.pe>
- Boundaries in Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(1), 54-65.
- Brown, R., & Williams, E. (2017). Strategies for leakage management in urban water distribution systems. *Water Utility Management Quarterly*, 22(2), 56-67.
- Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2014). *The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies*. W.W. Norton & Company.
- Caballero, L. (2010). El acueducto de Segovia: historia, técnica y restauración. Real Academia de Historia.
- Campbell, E. (2013). Propuesta Para una Metodología de Sectorización de Redes de Abastecimiento de Agua Potable. Valencia, España: Universidad Politecnica de Valencia.
- Campbell, E. (2017). Sectorización de Redes de Abastecimiento de Agua Potable basada en detección de comunidades en redes sociales y optimización heurística. Valencia, España: Tesis doctoral. Universidad Politecnica de Valencia.
- Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2009). *Introduction to Algorithms* (3rd ed.). MIT Press.
- Creaco, E., Franchini, M., & Alvisi, S. (2016). Optimal design of district metered areas in water distribution systems. *Water Resources Management*, 30(12), 4247-4259.
- Davis, M. L., & Cornwell, D. A. (2012). *Introduction to Environmental Engineering*. McGraw-Hill Education.
- Di Nardo, A., & Di Natale, M. (2011). An approach to identify cost-effective sector configurations for water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(1), 54-65.

Di Nardo, A., Di Natale, M., & Santonastaso, G. F. (2013). Innovative techniques for district metering area design in water distribution systems. *Water Science and Technology: Water Supply*, 13(5), 1174-1180.

Di Nardo, A., Di Natale, M., Santonastaso, G. F., & Venticinque, S. (2013). An automated tool for hydraulic sectorization of water distribution networks. *Water Science and Technology: Water Supply*, 13(4), 951-957.

Diao, K., Zhou, Y., & Rauch, W. (2013). Automated Creation of District Metered Area

Díaz, M., Rodríguez, L., & Pérez, J. (2020). Técnicas avanzadas en la gestión de redes de distribución de agua potable. *Editorial Técnica*, 45-67.

Diestel, R. (2017). *Graph Theory* (5th ed.). Springer.

District Metered Areas Identification. *Procedia Engineering*, 70, 1518-1523.

Duran, M., & Restrepo, J. (2019). Técnicas avanzadas en la gestión de redes de distribución de agua potable. *Editorial Técnica*, 45-67.

Elman, J. L. (1990). Finding structure in time. *Cognitive Science*, 14(2), 179-211.

Farley, M., & Trow, S. (2003). *Losses in Water Distribution Networks: A Practitioner's Guide to Assessment, Monitoring, and Control*. IWA Publishing.

Fernández Troyano, L. (2004). *Bridge Engineering: A Global Perspective*. Thomas Telford Publishing.

Fernández, P., López, A., & Herrera, S. (2020). Optimización de la red de distribución de agua mediante la sectorización por presión. *Revista Internacional de Ingeniería*, 15(1), 58-72.

Forero, E. (2001). *Historia del Acueducto de Bogotá*. Instituto Distrital de Cultura y Turismo de Bogotá.

Fu, M., Rong, K., Huang, Y., Zhang, M., Zheng, L., Zheng, J., Falah, M. W., & Yaseen, Z. M. (2022). Graph neural network for integrated water network partitioning and dynamic district metered areas. *Scientific Reports*, 12(1).

García, J., & Martínez, L. (2020). Optimización energética en redes de distribución de agua mediante sectorización por potencia. *Revista de Ingeniería Hidráulica*, 25(3), 45-59.

García, J., Martínez, L., & Torres, P. (2020). Evaluación y análisis de redes de distribución de agua. *Ingeniería del Agua*, 17(2), 34-49.

García, M., López, S., & Martínez, P. (2021). Factors contributing to leaks in water distribution networks. *Water Systems Research*, 27(3), 112-125

García, M., Torres, R., & Díaz, L. (2019). Mantenimiento preventivo en redes de distribución de agua. *Gestión del Agua y Sostenibilidad*, 13(4), 144-158.

Gibbs, P. (2010). *Advanced Engineering Mathematics*. McGraw-Hill Education.

Gigerenzer, G., & Gaissmaier, W. (2011). Heuristic decision making. *Annual Review of Psychology*, 62(1), 451-482

Giustolisi, O., & Ridolfi, L. (2014). New modularity-based approach to segmentation of water distribution networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(10), 04014050.

Giustolisi, O., Kapelan, Z., Savic, D. A., & Berardi, L. (2012). An evolutionary multi-objective strategy for the effective management of water distribution networks. *Journal of Hydroinformatics*, 14(4), 784-798.

Gomes, R., Sousa, J., & Marques, A. S. (2016). Optimal location of flow meters in water distribution networks: A sensor placement approach. *Water Resources Management*, 30(2), 739-753.

González, J., Martínez, L., & Rodríguez, P. (2020). Evaluación inicial de redes de distribución de agua: Enfoques y técnicas. *Revista de Ingeniería Hidráulica*, 35(1), 45-59.

González, M., Rodríguez, J., & Sánchez, L. (2017). *Historia y evolución de las redes de distribución de agua potable*. Editorial Técnica.

González, R., Martínez, P., & López, S. (2019). Sectorización por potencia en redes de distribución de agua: El caso de Madrid. *Journal of Water Management*, 35(3), 210-225.

Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press.

Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., ... & Bengio, Y. (2014). Generative adversarial nets. In *Advances in neural information processing systems* (pp. 2672-2680).

Herrera, M., Canu, S., Karatzoglou, A., & Pérez-García, R. (2010). An active learning approach for reducing the calibration time of hydraulic models. *Journal of Hydroinformatics*, 12(4), 430-442.

Hidropacífico, C. (2019). Bocatoma - hidropacífico. Hidropacífico.
<https://www.hidropacifico.com/la-bocatoma-es-pieza-clave-del-sistema-de-acueducto/bocatoma/>

Hill, C. (2016). *Water Supply and Distribution Systems*. New York: McGraw-Hill Education.

Historia Acueducto, Agua y Alcantarillado de Bogotá (s/f).
<https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/la-empresa/historia>

Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735-1780.

Infraestructura Acueducto, Agua y Alcantarillado de Bogotá (s/f).
<https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/acueducto-y-alcantarillado/la-infraestructuraAcueducto/#:~:text=El%20proceso%20inicia%20desde%20la%20captaci%C3%B>

[3n%20de%20las,Gachancip%C3%A1%2C%20Sop%C3%B3%2C%20Cota%2C%20Funza%2C%20Madrid%2C%20Mosquera%20y%20Soacha.](#)

International Society of Automation. ISA (2017). SCADA systems: A primer (3rd ed.).

Jones, A., & Brown, R. (2020). Economic impacts of water leaks in urban distribution networks. *Journal of Urban Water Management*, 8(1), 78-89.

Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). Imagenet classification with deep convolutional neural networks. In *Advances in Neural Information Processing Systems* (pp. 1097-1105).

LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436-444.

LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., & Haffner, P. (1998). Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*, 86(11), 2278-2324.

Lewis, M. J. T. (2001). *Surveying Instruments of Greece and Rome*. Cambridge University Press

López, A., Sánchez, M., & Torres, P. (2019). Gestión eficiente de redes de distribución de agua: Sectorización por potencia. *Ingeniería del Agua*, 30(4), 78-92.

López, M., & Sánchez, A. (2019). Diseño y optimización de sectores en redes de distribución de agua. *Ingeniería del Agua*, 16(3), 78-93.

Management, 139(2), 184-190.

Martínez, J., & Gómez, F. (2019). Control de presión en redes de distribución de agua. *Ingeniería del Agua*, 15(2), 89-104.

Martínez, J., Pérez, G., & Hernández, F. (2021). Tecnologías de control de presión en redes de distribución de agua. *Tecnología y Gestión del Agua*, 20(2), 112-128.

Martínez, R., & López, A. (2018). *Sectorización y optimización de redes de agua potable*. Water Management Journal, 32(4), 256-268.

Martínez-Cámara, E., Tabik, S., Herrera, F. (2021). Inteligencia Artificial y Tecnologías Digitales para los ODS. Publicación de la Real Academia de Ingeniería.

Mays, L. W. (2000). Water Distribution Systems Handbook. McGraw-Hill Education. (Mays, 2000)

Mays, L. W. (2012). Water distribution systems handbook (2nd ed.). McGraw-Hill Education.

McCulloch, W. S., & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. The Bulletin of Mathematical Biophysics, 5(4), 115-133.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico*.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2021). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico*.

Minsky, M., & Papert, S. (1969). Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry. MIT Press.

Mohtar, R. H. (2014). Modern Water Resources Engineering. McGraw-Hill Education.

Montaña, J. (1998). Los acueductos coloniales en América. Fondo de Cultura Económica.

Montes Álvarez, J. C. (2017). Cálculo hidráulico de redes de distribución de agua potable utilizando redes neuronales. Universidad de los Andes.

Mounce, S. R., Mounce, R. B., & Boxall, J. B. (2011). Novelty detection for time series data analysis in water distribution systems using support vector machines. *Journal of Hydroinformatics*, 13(4), 672-686.

Moya, E., & Moya, E. (2019). Los acueductos. Ara Blog.

- Nevels, R. D. (2017). *Water Supply Systems: New Technologies*. CRC Press. (Nevels, 2017)
- Newman, M. E. J. (2006). Modularity and community structure in networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(23), 8577-8582.
- Novak, P., Moffat, A. I. B., Nalluri, C., & Narayanan, R. (2007). *Hydraulic Structures*. CRC Press. (Novak, 2007)
- Ostfeld, A., Salomons, E., & Lindell, O. et al. (2012). Battle of the water calibration networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(5), 523-532.
- Pané, G. H. (2016). El Acueducto de Segovia es más reciente de lo que pensábamos.
- Parks & Recreation Department. (2018). *Water intake structures: Design and operation*
- Perelman, L., & Ostfeld, A. (2011). Topological clustering for water distribution systems analysis. *Environmental Modelling & Software*, 26(7), 969-972.
- Pérez, F., Ramírez, S., & Torres, H. (2015). *Diseño y operación de redes de distribución de agua potable*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(3), 04014089.
- Pérez, F., Ramírez, S., & Torres, H. (2015). *Implementation of macrometers in potable water distribution networks*. *Journal of Hydraulic Engineering*,
- Pérez, J., Gómez, F., & Martínez, R. (2021). Tecnologías avanzadas en la gestión de redes de distribución de agua. *Ingeniería y Gestión del Agua*, 22(2), 134-149.
- Pérez, R., Blokker, E. J. M., & Vreeburg, J. H. G. (2011). Improved efficiency of water supply systems using self-cleaning networks. *Water Research*, 45(13), 4093-4101.
- Pons, P., & Latapy, M. (2005). Computing communities in large networks using random walks. . In *Computer and Information Sciences-ISCIS 2005* (pp. 284-293). Springer.
- Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D. A., & Koppel, T. (2010). A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal*, 7(1), 25-45.

REDHISP. (2011). Group of Hydraulic Networks and Presurized Systems. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.

Rodríguez, A., & Gómez, M. (2018). Distribución equitativa del agua potable: Desafíos y soluciones. *Agua y Desarrollo Sostenible*, 12(4), 33-47.

Rodríguez, A., & Hernández, M. (2021). Mejora de la calidad del servicio en redes de distribución de agua. *Agua y Desarrollo Sostenible*, 12(4), 33-47.

Rodríguez, M. (2015). El Acueducto de Santa Fe: evolución y adaptaciones. Universidad Nacional de Colombia. (Rodríguez, 2015)

Rosenblatt, F. (1958). The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review*, 65(6), 386-408.

Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 323(6088), 533-536.

Russell, S. J., & Norvig, P. (2020). *Artificial intelligence: A modern approach* (4th ed.). Pearson

Russell, S., & Norvig, P. (2016). *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (3rd ed.). Pearson.

Salguero, F. (2021). La sectorización basada en criterios energéticos como herramienta para la gestión hídrica de redes de distribución de agua.

Savic, D., Kapelan, Z., & Diao, K. (2014). Real-time data management for water distribution networks: Sensor data analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(10), 04014038.

Schmidhuber, J. (2015). Deep learning in neural networks: An overview. *Neural Networks*, 61, 85-117.

Scibetta, M., Boano, F., Revelli, R., & Ridolfi, L. (2014). Community Detection as a Tool for

Sistemas de acueducto. (s/f.). Fibras y normas de Colombia.

<https://blog.fibrasynormasdecolombia.com/acueducto/>

Smith, J. (2005). The evolution of water distribution systems. Historical Infrastructure Press

Smith, J. (2019). Challenges in water distribution networks: Understanding and managing leaks. *Water Engineering*, 15(2), 45-56.

Todd, D. K., & Mays, L. W. (2005). Groundwater Hydrology. Wiley

United Nations. (2017). Water resources management and sustainable development goals (SDGs).

Vegas, O. (2012). Herramientas de ayuda a la sectorización de redes de abastecimiento de agua basadas en la teoría de grafos aplicando distintos criterios. Valencia: Universidad Politecnica de Valencia.

Vegas, O., Martínez, F., & Tzatchkov, V. (2016). Aplicación de la teoría de grafos a la identificación de subsistemas hidráulicos en redes de distribución de agua. XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica.

Vieyra, C. T. (2020). El acueducto de Morelia. Revista Juglares.

Walski, T. M., Chase, D. V., Savic, D. A., Grayman, W., Beckwith, S., & Koelle, E. (2003). Advanced Water Distribution Modeling and Management. American Water Works Association (AWWA). (Walski, 2003)

Walski, T. M., et al. (2003). Water Distribution Systems. American Water Works Association.

Ward, A. D., & Trimble, S. W. (2004). Environmental Hydrology. CRC Press. (Ward & Trimble, 2004)

Water UK. (2020). Storage of water in aqueducts for ensuring constant and reliable water supply.

- Wendrich, W., Cappers, R., & Holdaway, S. (2016). *The Faiyum: A Land of Water and History*. Fayum Project Papers in Archaeology and History.
- White, L., & Miller, G. (2019). Enhancing water distribution network efficiency through smart monitoring and maintenance practices. *Water Resources Management Review*, 18(3), 145-158.
- Wilson, R. J. (1996). *Introduction to Graph Theory* (4th ed.). Prentice Hall.
- World Health Organization (2017), *Guidelines for Drinking-water Quality: Fourth Edition Incorporating the First Addendum*.
- Wu, W., Zhang, Y., & Xia, X. (2010). Optimization of water distribution network operation based on improved genetic algorithm. *Advances in Water Resources*, 33(4), 502-512.
- Yazdani, A., & Jeffrey, P. (2012). Water distribution system vulnerability analysis using weighted and directed network models. *Water Resources Research*, 48(6), W06517.
- Zhang, Q., Maier, H. R., & Simpson, A. R. (2018). A neural network approach to predict rare and unobserved events in water distribution systems. *Water Resources Research*, 54(5), 3665-3684.
- Zhang, Z., Lipton, Z. C., Li, M., & Smola, A. J. (2018). Dive into deep learning. arXiv preprint arXiv:2106.11342.