

Calibración de Redes de Distribución de Agua Potable Mediante Software Computacional

Yulieth Valentina Suarez Cruz

Facultad de Ingenierías y Arquitectura,
Universidad de Pamplona, Pamplona, Norte de Santander

Msc. Carlos Alexis Bonilla Granados

26 junio de 2023

Introducción

La presente monografía tiene como objetivo principal proporcionar información sobre los modelos hidráulicos utilizados en la calibración de redes de distribución de agua (RDA), abarcando cada uno de los parámetros que se deben tener en cuenta en la calibración de estas. En la actualidad los modelos computacionales son herramientas de gran ayuda en la solución de múltiples problemas y optimización de costos en diversas áreas. los modelos hidráulicos son herramientas fundamentales en el diseño, análisis, operación y mantenimiento de las redes, por su precisión en los datos reflejados, proporcionando confiabilidad en la toma decisiones en las RDA.

Conforme a la American Water Works Association (AWWA), la calibración de las RDA implica comparar los datos obtenidos del modelo hidráulico con medidos en campo, efectuando ajustes a los parámetros del modelo hasta que los dos modelos concuerden (AWWA, 2013). Estos parámetros deben ser precisos, basados en observaciones reales, puesto que las redes presentan cambios significativos producidos durante el tiempo de funcionamiento, los cuales se ven reflejados en los resultados del modelo. Según Rodríguez & Benavides (2021), en la simulación hidráulica de una RDA, es fundamental tener en cuenta sus propiedades: la topología, los nodos de demanda, el coeficiente rugosidad y presiones, para conseguir resultados precisos de red de estudio (p. 4 - 5).

Las RDA han jugado un papel importante en el progreso de la humanidad, partiendo desde "qanats" (túneles en las colinas ligeramente inclinados) construidos en el año 700 a. C por los persas, acueductos hechos por los romanos en el año 312 a. C, sistemas de recolección de agua de manantial en Machu Pichu en Perú en 1450, la primera RDA pública en Estados Unidos

se realizó en 1652, a comienzos del siglo XX las tuberías de suministro de agua hechas de acero, hierro dúctil, cemento de asbesto y hormigón armado (Ormsbee, 2007).

En la búsqueda de mejoras en las redes surgieron numerosas complejidades, requiriendo una estimación precisa de los flujos y presiones, dando origen a la modelación de métodos la que analice. Realizando una investigación exhaustiva para establecer cómo clasificar el número potencial de incógnitas de una red, de manera que la optimización hidráulica pueda realizar sin necesidad de resolver un número enorme de fórmulas (equivalente al número de incertidumbres) (Walski et al., 2006).

Los métodos de calibración de RDA están orientados a que el número de incógnitas concuerden con el número de inspecciones realizadas en campo, para determinar una solución (Ormsbee, 2007). Los métodos más relevantes durante el período de desarrollo de estos, fueron los siguientes: método de Hardy Cross, método del Nodo Simultáneo o método clásico de Newton Raphson, método de la Teoría Lineal, método del Circuito Simultáneo, método del Gradiente Hidráulico o método de la Red Simultánea. Actualmente se utilizan métodos de programación como: Particle Swarm Optimization (PSO), Algoritmos Evolutivos, Graph Convolutional Networks (GCN), Artificial Neural Network (ANN), etc.

Índice General

Introducción	2
Capítulo 1: Generalidades	8
Red de Distribución de Agua (RDA)	8
Elementos Físicos de la RDA.....	8
Tipología	11
Tipos de distribución.....	14
Modelos Hidráulicos	16
Construcción de los modelos.....	18
Software de Modelación Hidráulica.....	18
Capítulo 2: Calibración de las RDA	21
Procedimiento para la Calibración de una RDA	21
Variables Topológicas.....	23
Variables Hidráulicas	23
Variables a Calibrar en un Modelo Hidráulico	23
Fuentes de error en los modelos hidráulicos	27
Capítulo 3: Métodos de Calibración	29
Particle Swarm Optimization (PSO)	29
Artificial Neural Network (ANN).....	36
Algoritmos Evolutivos	47

Graph Convolutional Networks (GCN)	56
Conclusiones	62
Bibliografía	64

Índice de Figuras

Figura 1	12
Figura 2	13
Figura 3	13
Figura 4	14
Figura 5	15
Figura 6	30
Figura 7	32
Figura 8	34
Figura 9	34
Figura 10	36
Figura 11	38
Figura 12	39
Figura 13	40
Figura 14	43
Figura 15	45
Figura 16	48
Figura 17	50
Figura 18	53
Figura 19	56
Figura 20	58
Figura 21	59
Figura 22	60

Índice de Tablas

Tabla 1	24
Tabla 2	25
Tabla 3	33
Tabla 4	44
Tabla 5	51
Tabla 6	52
Tabla 7	54

Capítulo 1: Generalidades

Red de Distribución de Agua (RDA)

Una RDA es una agrupación de instalaciones que funciona transportando agua presurizada desde la planta potabilizadora o la estructura de almacenamiento (según sea el caso) hasta la conexión del servicio, en las condiciones deseadas: calidad, caudal, presión, continuidad del suministro, etc.; a lo largo del periodo para la que fue diseñada. La red se divide en: red de distribución primarias y red de distribución secundarias (SIAPA, 2014).

La red primaria, también conocida como red matriz: es el grupo de tuberías que conforma las mallas principales de servicio de acueducto de la población, distribuyen el fluido proveniente de la planta potabilizadora o estructura de almacenamiento hacia las redes secundarias del acueducto, conserva las presiones necesarias del servicio para la correcta operación del sistema de distribución. Las redes secundarias: llevan el fluido a los domicilios públicos y privados (RAS TITULO B, 2010).

Elementos Físicos de la RDA

Toda RDA está conformada por componentes complementarios necesarios para que el sistema funcione correctamente.

Bocatoma o embalse

Componente físico que suministra fluido a la red. El RAS TITULO B (2010) la define como la infraestructura hidráulica que se encarga de captar el agua de la fuente y lo transporta al sistema de suministro del fluido.

Deposito o tanque de almacenamiento

Infraestructura de almacenamiento del agua tratada. Puede colocarse en la fuente de abastecimiento (cuerpos superficiales o subterráneos), al final del sistema de conducción o en

otro lugar (comúnmente en zonas altas) que sea conveniente para el buen funcionamiento del sistema. Tiene la función de regular caudales y presiones, el abastecimiento constante de agua, dar abastecimiento en momentos picos o en situaciones de emergencia, permitiendo en las horas de bajo consumo la restauración del volumen, para que el suministro sea estable durante los periodos de máximas demandas.(RAS TITULO B, 2010).

Tuberías

Es un conducto que permite la conducción y distribución del fluido a presión en una red dada. Las tuberías están determinadas por el diámetro, el material y tipo de junta (RAS TITULO B, 2010).

Bombas

Elementos destinados a aumentar la presión del agua para transportarla a estructuras elevadas, pueden estar ubicadas los depósitos u otro lugar donde se necesite presión adicional (RAS TITULO B, 2010).

Válvulas

Son componentes que controlan o regulan el caudal y la presión del fluido de una RDA en un tramo de tubería determinada (RAS TITULO B, 2010).

Válvula reductora de presión. Aldaz (2020) expresa que las válvulas son necesarias en los puntos de la red en los que es preciso reducir la presión debido a una presión elevada. Este tipo de válvulas poseen reducen la presión aguas abajo (en dirección al flujo) de esta. La reducción de presión es crucial por diversos motivos, entre ellos evitar posibles roturas en las instalaciones, reducir el caudal de fuga y asegurarse el fluido llegue a los sitios de consumo con la presión apropiada.

Válvula sostenedora de presión Sostienen una presión estable aguas arriba de esta, independiente de las variaciones de caudal. De este modo, en una zona o sector mantiene automáticamente una presión fija y se cierra tras una caída de presión aguas arriba (en contra del flujo) de la válvula, cuando la presión aumenta, la válvula se abre con el propósito de que disminuya la presión (Aldaz, 2020).

Válvula reguladora de caudal. Permiten el paso del agua en ambos sentidos, son bidireccionales y se utilizan para controlar el caudal abriéndolas y cerrándolas con distintos ángulos de apertura. Estas válvulas habitualmente van sucesivas de un caudalímetro en la red, de modo que tan pronto como se activan, frecuentemente, los operarios utilizan el caudal que fluye a través de las válvulas como referencia, lo que hace que a menudo no estén al tanto del grado de apertura de las válvulas. (Aldaz, 2020).

Válvulas de retención. Permiten controlar el sentido del flujo y se instalan en múltiples puntos, como las salidas de los embalses y en las estaciones de bombeo. Su función es detener los fenómenos de golpe de ariete y evitar el retorno del agua. (Aldaz, 2020).

Válvulas de corte Detienen el flujo de agua. Suelen colocarse estratégicamente por toda la red, en los nodos clave donde se producen los movimientos primarios, en las entradas de los sectores y en los puntos críticos. Estas válvulas se utilizan para aislar un tramo de tubería cuando hay una fuga (Aldaz, 2020).

Válvulas motorizadas Pueden ser de cualquiera de los tipos de válvulas mencionados; la única distinción es que utilizan un motor en lugar de un accionamiento manual. Estas pueden abrirse y cerrarse mediante un mando a distancia, lo que elimina la necesidad de desplazarse físicamente hasta donde se encuentran (Aldaz, 2020).

Nodos

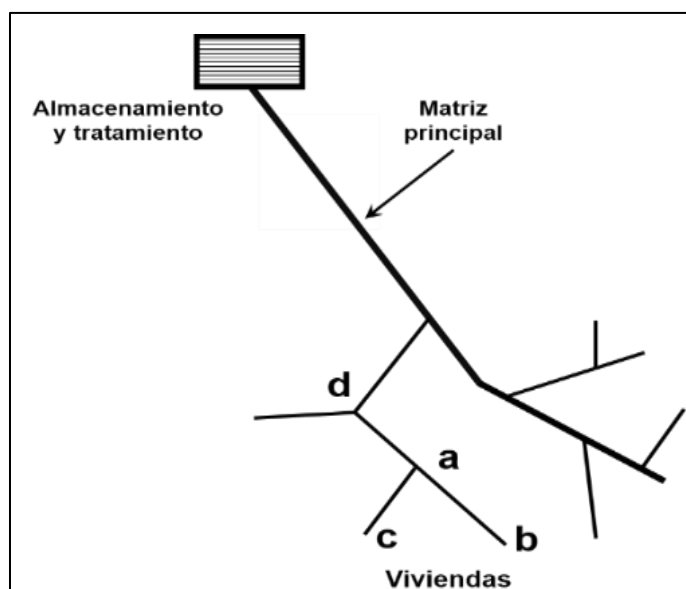
Son elementos que unen dos o más tuberías, proporcionan un punto hidráulico en donde se puede extraer o inyectar flujo en la red (RAS TITULO B, 2010).

Tipología

Son los datos que determinan el trayecto y la distribución de la red. De acuerdo a Molía, (n.d.) las redes de distribución pueden configurarse como una red abierta o sistema ramificado, un sistema de circuitos o sistema mallado o, en determinadas situaciones y una combinación de ellos.

Sistema abierto

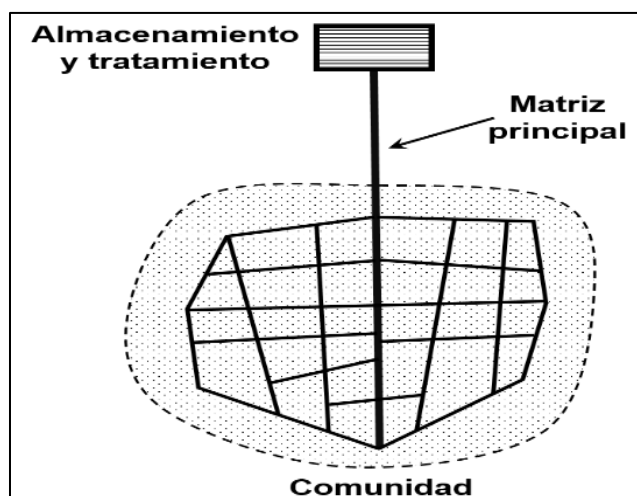
Este sistema se compone de una red principal que se ramifica en múltiples secciones más pequeñas, terminando en mallas más reducidas (puntos muertos), que se asemejan a una espina de pescado, (Figura 1). Es utilizado frecuentemente lugares en donde la topografía es difícil, haciendo viable realizar interconexiones entre ramales. Un inconveniente de este sistema se presenta en el momento en que se realicen reparaciones o mantenimiento, una parte de la población se quedaría sin servicio ya que el flujo va en un solo sentido (USAID, 2016).

Figura 1*Sistema de distribución ramificada*

Nota. La figura muestra el esquema una la red ramificada, tomado de USAID (2016, p.34).

Sistema cerrado

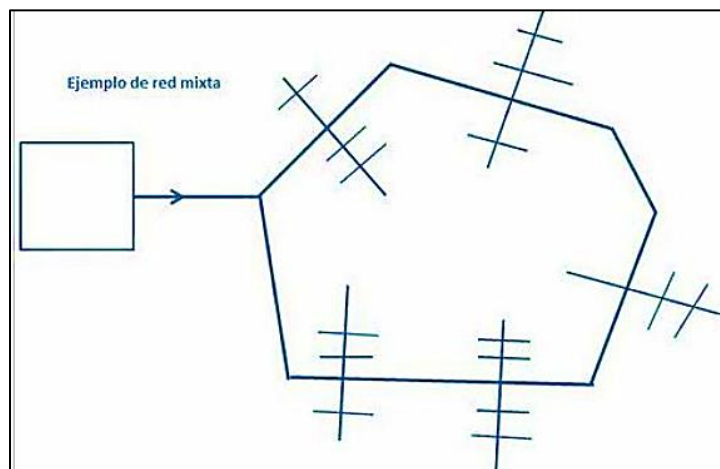
Según USAID (2016) el fluido circula por tuberías que se conectan en modo de malla (Figura 2), generando un sistema cerrado. Este sistema presenta una alta eficiencia en términos de presión y caudal, debido a que no contiene puntos muertos y los tramos de la red son alimentados por ambos extremos. Esto se deriva en una reducción de las pérdidas de carga.

Figura 2*Sistema de distribución mallado*

Nota. La figura muestra el sistema de distribución mallado, tomado de USAID (2016, p.34).

Sistema mixto

Es la combinación del sistema mallado y ramificado, se llevan a cabo zonas densamente pobladas y su crecimiento se extiende a lo largo de vías de acceso (M. García, 2006).

Figura 3*Sistema de distribución mixto*

Nota. La figura muestra el sistema de distribución mixto, tomado de Conceptos Básicos de WATERCAD (n.d.).

Tipos de distribución

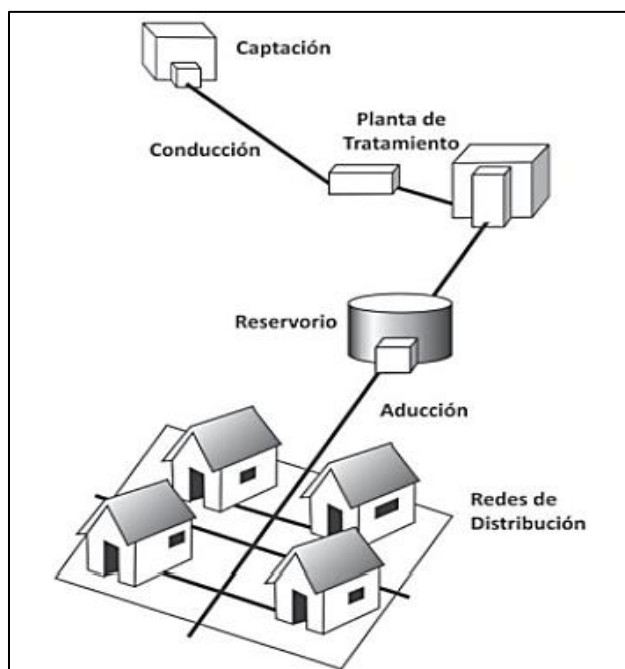
La tipología y las características físicas del terreno influyen considerablemente en la distribución de la red. El suministro del agua se puede realizar de tres maneras:

Gravedad

De acuerdo a Castro & Ruben, (2009), la fuente y el tanque de almacenamiento se encuentran situados a mayor altura que la zona de distribución, por ello el agua fluye en la red por gravedad a presión suficiente y constante. Este tipo de distribución permite: valores de mantenimiento bajos, funcionamiento simple, variaciones graduales de presión, rangos de presiones fijos y una capacidad de reserva ante alguna anomalía. Sin embargo, al momento de realizar futuras ampliaciones a la red se pueden presentar complicaciones debido a la topografía.

Figura 4

Tipo de distribución por gravedad



Nota. La figura presenta una RDA por gravedad, tomado de Castro & Ruben (2009).

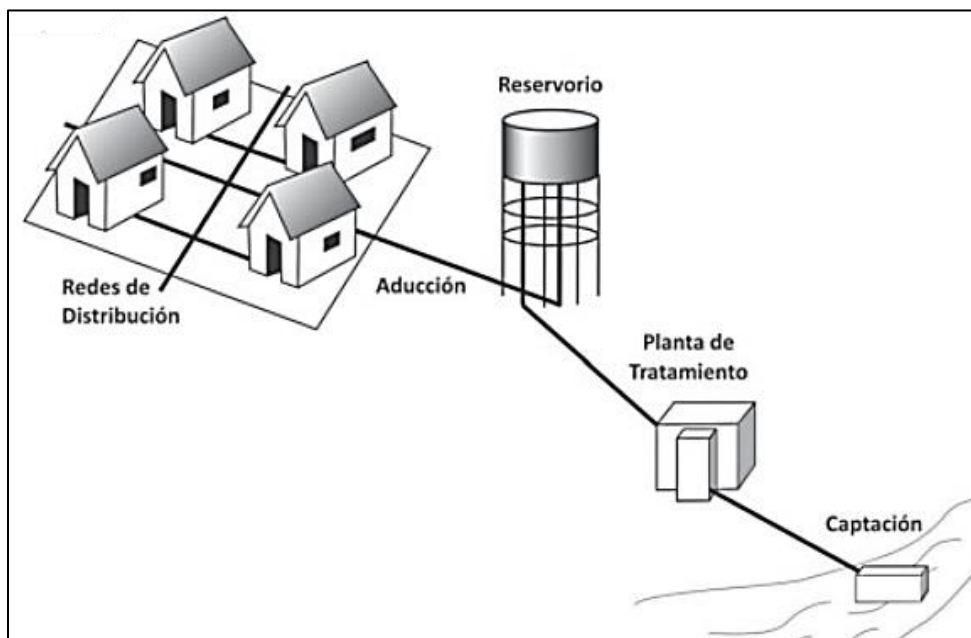
Bombeo

Un sistema de bombeo es aquel que utiliza un dispositivo motor-bomba para desplazar un fluido a lo largo de una tubería desde un punto A hasta un punto B. Mediante energía se abastece el motor, la bomba transforma la potencia mecánica a una potencia de salida, lo que aumenta la presión y velocidad produciendo el bombeo de un líquido (Martínez, 2020).

Según Cabarcas & Barrios (2020), este sistema funciona bombeando la demanda directamente a la red, siendo irrelevante el almacenamiento para equilibrar la demanda, En su lugar, depende del suministro eléctrico fiable, también es necesario reservar una fracción de la capacidad de bombeo para imprevistos. En este sistema se puede conseguir diferentes presiones en el sistema, pero su manejo y funcionamiento son complejos. Hay que disponer de una fuente principal de energía y otras de reserva por si falla la primaria.

Figura 5

Tipo de distribución por bombeo directo



Nota. Sistema de abastecimiento por bombeo, tomado de Castro & Ruben, (2009).

Combinado

En sistema de distribución combinada una porción del sector de distribución se abastece por bombeo y el otro sector por gravedad. Se necesitan de tanques de almacenamiento y una capacidad de impulsión del caudal o bombeo (menor que en el sistema de bombeo). La ventaja más importante de este sistema se da cuando al presentarse una irregularidad en el sistema el sector afectado puede ser mantenida por el sistema de bombeo más contiguo (Cabarcas & Barrios, 2020).

Modelos Hidráulicos

Los modelos hidráulicos son la representación digital de una RDA, describe matemáticamente el flujo, simula y prevé el comportamiento de la red, proporcionando la realización de pruebas y evaluar diferentes escenarios para definir soluciones eficientes, sin requerir grandes recursos económicos y tiempo. Además, es de gran importancia en el suministro de información para la planificación, diseño, implementación y operación teniendo un control en tiempo real. Todo modelo hidráulico cuenta la etapa construcción y de calibración del modelo, y se debe desarrollar de forma estructurada y sistemática (Rodríguez & Benavides, 2021).

Según Molina & Stephenson (2014), los modelos se componen de una amplia recopilación de la información de las características físicas, los patrones de consumo y las condiciones de operación del sistema. Dispone de los métodos numéricos indispensables para determinar el grupo de fórmulas matemáticas del sistema, reproduciendo el comportamiento hidráulico de los distintos elementos del mismo. El objetivo de la modelación hidráulica es simular con la mayor exactitud posible el comportamiento una red. Así es posible comprender la dinámica actual de la red de distribución y examinar cómo reacciona ante determinadas circunstancias.

De acuerdo al Anexo 2 Documento Compilatorio del RAS: Art. 57. **Modelación de redes de distribución de agua.** En las RDA los modelos hidráulicos son suma importancia para prever el comportamiento en diversas condiciones de funcionamiento, mantenimiento o ampliación. Teniendo en cuenta los factores mencionados:

1. Es necesario incorporar los patrones de consumo medidos en campo en los nodos, en período extendido y con frecuencia horaria. Cuando no se disponga de información, se justificará la elección de los patrones empleados.
2. Para los cálculos en el software de modelado hidráulico debe utilizarse el método del gradiente.
3. Calibrar y validar los modelos hidráulicos, de acuerdo a las series reales de; presión, caudal y niveles de tanques.
4. Cada modelo hidráulico deben validarse al menos cada cinco años o si se produce un cambio significativo. (ANEXO 2 DOCUMENTO COMPILATORIO DEL RAS, 2022).

Los modelos hidráulicos se clasifican en dos categorías principales: estacionarios y extendidos. Los estáticos, también conocidos como modelos de análisis en régimen estacionario, buscan establecer valores para las variables del sistema sin tener en cuenta las fluctuaciones temporales. Por otro lado, los modelos extendidos o dinámicos, modelan el comportamiento de la red en el transcurso del tiempo, teniendo en cuenta las fluctuaciones temporales. Estos son más complejos y permiten realizar análisis más detallados de eventos transitorios, como arranques y paradas de bombas, alteraciones bruscas de demanda y golpes de ariete. Proporcionan una visión más precisa y completa del comportamiento dinámico de la red hidráulica (Molina & Stephenson, 2014).

Construcción de los modelos

En este proceso es fundamental considerar la distribución de los componentes físicos de la RDA que se representan en el modelo, como tuberías, nodos, depósitos, embalses, válvulas y bombas. De acuerdo a la especificación exigida y de los datos disponibles de la RDA.

Posteriormente, la red se esqueletiza o reduce, se estiman los patrones de consumos existentes, posición espacial y temporal en los nodos del modelo (Rondan, 2016). Consiguiendo un modelo totalmente funcional, aunque con resultados de simulación notablemente diferentes de los calculados en campo. En la segunda etapa del modelo se da solución a la diferencia de resultados por medio de la calibración; fundamentada en el acoplamiento de los parámetros que se le insertan: coeficiente de rugosidad en las tuberías, diámetros, perdidas menores, demandas desconocidas presiones y fugas (Molina & Stephenson, 2014).

Software de Modelación Hidráulica

REDES

Es un programa de modelación hidráulica que fue creado en el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA), de la Universidad de los Andes, Colombia. Cuenta con varios componentes que posibilitan editar, diseñar y realizar cálculo hidráulico y de calidad del agua de una RDA. En la edición, se pueden generar o importar diversas redes. El Uso Óptimo de Potencia en Superficie (SUOP), el Gradiente Hidráulico Óptimo en Superficie (SOGH), los Algoritmos Genéticos (GA), la Búsqueda Armónica y el Diseño Rápido (una combinación de SOG y programación con restricciones) son algunas de las metodologías de diseño incluidas en el módulo de diseño, que permite la aplicación de dos fórmulas de diseño: Hazen-Williams y Darcy-Weisbach. El módulo de cálculo cuenta con diversas propiedades como: el cálculo

hidráulico estático y dinámico de la red, el cálculo de calidad del agua en períodos estático y dinámico, y la calibración de la RDA. (Saldarriaga et al., 2017).

WATERCAD

Es un modelado hidráulico utilizado en la simulación de RDA. Permite diseñar sistemas de agua, administrar las redes de agua existentes, disponer mecanismos de análisis hidráulico en régimen permanente de redes presurizadas en el tiempo: estático y extendido, análisis de del caudal en los sistemas de extinción de incendios, análisis de calidad, análisis de los consumos, probables pérdidas de caudal y presión, modelado de bombas, permitiendo analizar la red y localizar los puntos donde se originan estas pérdidas. (Eadic, 2016).

EPANET

De acuerdo a Rossman, L. A. (1994) EPANET USERS MANUAL, Epanet es un software de aguas generado por la Environmental Protection Agency (EPA), permite modelar RDA. Se emplea en el análisis de las RDA, simulación de redes presurizadas en período prolongado del comportamiento hidráulico y calidad del fluido, que pueden estar compuestas por tuberías, nodos, bombas, válvulas, tanques de almacenamiento y reservorios. Es utilizado en el rastreo de caudales en tuberías, la medición en los nodos de la presión, determinación de nivel del agua en los tanques y la identificación del origen del rastreo de la red durante la etapa de simulación. EPANET ofrece un editor visual de redes que facilita el desarrollo de modelos de redes, la modificación de propiedades y datos de la misma. Los resultados de un análisis de red pueden interpretarse más fácilmente con la ayuda de una serie de herramientas de generación de informes y visualización de la información, como mapas de red codificados, tablas de datos, consumo de energía, reacción, calibración, gráficos de series temporales, gráficos de perfil y

contorno. EPANET posee un simulador hidráulico avanzado, que brinda numerosas utilidades, entre ellas:

- Considera pérdidas de carga y los distintos tipos de demanda.
- Considera pérdidas menores accesorios.
- Admite distintos tipos de válvulas y bombas con velocidades constantes o variables.
- Permite simular tomas de agua cuyo caudal depende de la presión.
- Correlaciona los coeficientes de velocidad de reacción de la pared con los coeficientes de rugosidad de la tubería.

Capítulo 2: Calibración de las RDA

Según Vega (2007) la calibración de una RDA se basa en hallar un modelo hidráulico que simule de forma precisa y confiable el comportamiento del sistema existente (cálculo de caudal y presión) en un tiempo determinado, teniendo en cuenta las demandas de agua de los usuarios y la oferta de agua en la fuente en cuanto a masa y energía, los modelos pueden variar de acuerdo a la magnitud y complejidad del sistema. Sin embargo, este proceso es complejo debido a: cambios de las propiedades que presenta la red durante el tiempo de funcionamiento, mantenimientos no reportados o discordancia en la información que se tiene del sistema (planos, registro de topografía y/o características físicas).

La calibración radica en el ajuste de los componentes del modelo matemático de la red, esta rectificación se lleva a cabo con la finalidad de aumentar la similitud entre el simulador hidráulico y la RDA real. La calibración provee variables óptimas con el fin de maximizar el mejoramiento del modelo (ANEXO 2 DOCUMENTO COMPILATORIO DEL RAS, 2022). Los parámetros o variables que se deben tener en cuenta en la calibración de RDA son: topológicas e hidráulicas.

Procedimiento para la Calibración de una RDA

De acuerdo a Rondan (2016) al abordar un proceso de calibración, la estrategia general de calibración propuesta por Ormsbee (1989), Ormsbee y Lingireddy (1997), se compone de siete pasos:

1. Determinar la finalidad del modelo.
2. Establecer el valor inicial de los parámetros a evaluar (coeficientes de resistencia, características de las bombas, capacidad de almacenamiento, demanda asignada, entre otros).

3. Recolección de datos de calibración estos pueden ser reales o históricos del sistema de distribución. Estos datos se utilizan para comparar con los resultados del modelo y ajustar los parámetros, mejorando la precisión y la capacidad predictiva del modelo.
4. Evaluar el producto de la simulación comparándolos con la información recolectada en campo, se analiza la concordancia entre los resultados simulados y los valores observados, identificando posibles desviaciones y áreas de mejora.
5. Realizar una macrocalibración, implica localizar y ajustar los parámetros que provocan discrepancias entre la predicción del modelo y las mediciones reales. Esta etapa busca encontrar un conjunto óptimo de parámetros que mejore la precisión global del modelo en diferentes condiciones y escenarios.
6. Elaborar un análisis de sensibilidad se basa en evaluar cómo cambian los resultados del modelo al modificar los parámetros o condiciones clave. Este análisis ayuda a comprender la influencia de diferentes variables en el comportamiento del sistema ya identificar aquellas que tienen un impacto significativo.
7. Realizar una microcalibración implica ajustar componentes específicos del modelo hidráulico. Se cuantifica el efecto de cada variación en los resultados de la simulación y se determina los parámetros que tienen una mayor influencia en los resultados modelados. Esta etapa permite refinar y afinar el modelo, optimizando la precisión y la capacidad de predicción al considerar detalles más específicos del sistema.

Variables Topológicas

Según Saldarriaga & Jurado (2008), las variables topológicas están compuestas por componentes físicos del sistema, que controlan la dirección del flujo, velocidad del flujo y la distribución de la energía, como: el diámetro, la rugosidad y las pérdidas menores. Los diámetros varían con el tiempo, debido a la aparición de biopelículas, incrustaciones, sedimentos y otros factores que afectan el comportamiento hidráulico, afectando asimismo la contextura de las paredes del conducto, modificando el coeficiente de rugosidad. Las pérdidas menores (pérdidas de energía) dependen de la cantidad de accesorios que disponga la red. Dado que no es posible obtener estos valores analíticamente, por tanto, deben ser calibrados.

Variables Hidráulicas

Las variables hidráulicas definen como es el flujo a través de los elementos que conforman la red: demandas desconocidas y fugas. Las demandas desconocidas se representan como problemas de tipo comercial por dentro del sistema: conexiones ilegales des calibración, errores o ausencia de mediciones. Las fugas se deben a la presión, material y/o la edad del sistema, produciéndose en cualquier punto y magnitud en la red. Simulándose en un modelo hidráulico como emisores ubicados en los nodos, para el cálculo del caudal de salida, que varía en función a la presión del nodo (Saldarriaga & Jurado, 2008).

Variables a Calibrar en un Modelo Hidráulico

Coefficiente de Rugosidad

El RAS - TITULO B (2010), define el coeficiente de rugosidad como el cálculo de la rugosidad de la superficie interna de una tubería, y está influenciado por el estado y el material de dicha superficie. Según Aldaz (2020) es uno de los parámetros con mayor incertidumbre en los modelos hidráulicos de RDA, se puede asumir un valor concreto cuando una tubería es

totalmente nueva, pero como en una red nunca hay tuberías totalmente nuevas y su rugosidad puede aumentar con el tiempo debido a incrustaciones causadas por la cal u otros factores. Debido a esta falta de conocimiento preciso, el coeficiente de rugosidad se trata como una variable ajustable durante la calibración del modelo. Sin embargo, se considera uno de los últimos factores a modificar, ya que su variación tiene un impacto mínimo en el modelo, especialmente en redes extensas con tuberías de diámetros grandes. Por otro lado, en modelos con diámetros más pequeños, los coeficientes de rugosidad pueden ser utilizados para afinar y perfeccionar los resultados.

Es fundamental considerar que los coeficientes de rugosidad de la tubería pueden variar mucho según el tipo de material y las limitaciones concretas de la tubería, los cuales aparecen en la tabla:

Tabla 1

Coeficientes de Rugosidad para una tubería nueva

Material	C Hazen-Williams (universal)	ϵ Darcy-Weisbach (mm)	n Manning (universal)
Fundición	130 – 140	0.26	0.012 – 0.015
Hormigón	120 – 140	0.3 – 3.0	0.012 – 0.017
Hierro Galvanizado	120	0.15	0.015 – 0.017
Plástico	140 – 150	0.0015	0.011 – 0.015
Acero	140 – 150	0.045	0.015 – 0.017
Cerámica	110	0.3	0.013 – 0.015

Nota. Esta tabla contiene los coeficientes de la rugosidad de la tubería nueva, tomado de (M. García, 2006).

Coefficiente de Pérdidas de Presión.

De acuerdo al RAS TITULO B (2010) es la representación de la energía perdida, como resultado del paso del flujo a través de dicha la estructura, esta se representa en términos de altura piezométrica de velocidad representa la resistencia al flujo del agua en la tubería y se empleada para calcular la pérdida de energía o presión a medida que el fluido fluye a través del sistema. Según Ortega (2020) hay dos formas diferentes de pérdidas de presión: continúa debido a la fricción y locales (provocado por válvula, codo, etc.). Existen ecuaciones empíricas que pueden utilizarse para cuantificar las pérdidas de carga para el tipo de flujo turbulento que suele desarrollarse en los conductos de las redes de agua presurizada. La ecuación básica de las fórmulas de la Tabla 2 utilizada para calcular las pérdidas de carga es:

$$h_L = A Q^B$$

Donde:

h_L : Pérdida de carga

Q : Caudal

A : Coeficiente de resistencia

B : Exponente de caudal

Tabla 2

Fórmulas de coeficientes de perdidas

Fórmula	Coeficiente de Resistencia (A)	Exponente de Caudal (B)
Hazen-Williams	$10.674 C^{-1.852} d^{-4.871} L$	1.852
Darcy-Weisbach	$0.0827 f(\epsilon, d, Q) d^{-5} L$	2
Chezy-Manning	$10.294 n^2 d^{-5.33} L$	2

Nota. La tabla contiene los coeficientes de pérdidas de carga en el conducto a presión, tomado de (M. García, 2006).

Al igual que el coeficiente de rugosidad, el coeficiente de pérdidas de carga, también puede ser ajustado durante el desarrollo de calibración de un modelo hidráulico en algunas ocasiones. Si los valores calculados de pérdidas de carga no coinciden con los valores observados en la realidad, se pueden realizar modificaciones en el coeficiente de pérdidas de carga para mejorar la precisión del modelo y lograr una mejor correspondencia con los datos medidos (Aldaz, 2020).

Coefficiente Emisor

Aldaz (2020) expone que el coeficiente de emisión se modifica mientras se cambian las demás variables para garantizar que el caudal de fuga previsto por el simulador coincida con el caudal realmente observado en la red. El caudal de fuga aumentará cuando aumente el coeficiente de emisión, y viceversa.

$$Q = CP^x$$

Donde:

Q: Caudal (L/s)

C: Parámetro de entrada (L/sm), depende de la magnitud de la fuga ajustándose de acuerdo a la red.

P: Presión en el nodo (m.c.a)

x: Exponente en base a la ecuación de perdidas aplicada (Comúnmente se le asigna un valor de 0.5).

Demandas

El proceso de asignación de demandas implica añadir al modelo el consumo de agua correspondiente a cada nodo. El caudal utilizado por cada nodo de consumo de la red varia, ya que cada nodo está conectado a un sector o línea diferente. Si no se hace correctamente, este proceso puede llevar muchísimo tiempo y estar lleno de errores. En la simulación en un periodo estático, se asigna una demanda base constante a cada nodo de la RDA. Esta demanda base representa el consumo promedio esperado en ese nodo durante todo el período de simulación. Y cuando la simulación se hace en un período extendido, se incorporan las curvas patrón de demanda de cada nodo. Estas curvas patrón representan la variación de la demanda a lo largo del tiempo, teniendo en cuenta factores como las horas, los días o las estaciones del año. Cada nodo de consumo puede tener su propia curva patrón de demanda. También se utilizan las medias horarias de caudal provenientes de los caudalímetros, los cuales registran y proporcionan información sobre los flujos de agua en diversos puntos de la red. Estos datos de caudal, junto con las curvas patrón, se utilizan para calcular los patrones de demanda horarios y los valores de demanda para cada nodo de consumo en diferentes intervalos de tiempo. De esta manera, en la simulación en un período extendido, se obtienen diferentes patrones de demanda para cada nodo de consumo, considerando la conservación temporal de las demandas y los datos de caudal registrados. Esto permite tener en cuenta las fluctuaciones en el consumo de agua a lo largo del tiempo y realizar un análisis más detallado y realista del comportamiento de la RDA (Aldaz, 2020).

Fuentes de error en los modelos hidráulicos

Molina & Stephenson (2014), hacen referencia a varias fuentes, incluidas Ormsbee y Lingireddy (1997), el Comité de Aplicaciones Informáticas en Ingeniería de la AWWA (1999) y

Walski et al (2007), quienes sugieren algunas fuentes de inexactitud que aportar diferencias entre los datos observados en campo y los resultados simulados en modelos hidráulicos. Estas fuentes de inexactitud incluyen inexactitudes en los datos de entrada, determinación de las propiedades físicas de los conductos, consignación de la demanda, geometría y topología de la RDA, condiciones de entorno, nivel de simplificación del modelo, curvas características de la bomba y precisión del equipo de medición.

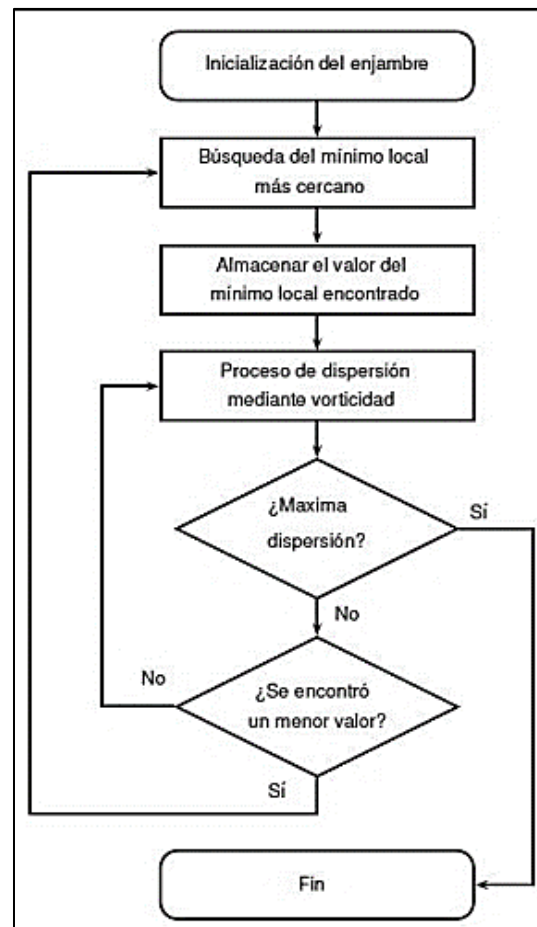
Capítulo 3: Métodos de Calibración

Particle Swarm Optimization (PSO)

El algoritmo Optimización de Enjambre de Partículas (PSO), fue creado por James Kennedy y Russell Eberhart en el año 1995, inspirados en el comportamiento colectivo de los seres vivos, en donde el desplazamiento de cada individuo (dirección, velocidad, aceleración, etc.), es el producto de la interacción de ese individuo con los demás. El algoritmo consiste en generar un enjambre inicial de n partículas, cada una de las cuales se componen de los siguientes parámetros: una posición que representa una combinación establecida de valores variables, un valor de la función objetivo asociado a esa posición, una velocidad que determina su desplazamiento y un patrón de la mejor posición alcanzada hasta el momento. Posteriormente, se evalúa cada partícula utilizando la función objetivo, actualizando sus posiciones y velocidades en función de reglas matemáticas. El algoritmo continúa iterando hasta satisfacer el criterio de parada definido, si este criterio no se satisface, se reinicia el proceso desde la etapa de evaluación de cada partícula. De esta manera, el algoritmo busca encontrar la mejor solución moviendo a la población de partículas a lo largo del espacio de búsqueda utilizando reglas matemáticas que considerando tanto la posición como la velocidad de las partículas (Gutierrez-Bahamondes et al., 2018). La Figura 6 presenta el desarrollo de búsqueda del algoritmo PSO.

Figura 6

Diagrama de flujo de PSO.



Nota. Esquema para el proceso de búsqueda PSO, tomado de Cuchango et al., (2014).

De acuerdo a Sarmiento (2012) el algoritmo de PSO tiene varias ventajas que lo hacen popular y efectivo en problemas de optimización. Algunas ventajas del PSO son:

- Es relativamente simple y fácil de implementar, no pide muchas configuraciones complicadas ni de un conocimiento especializado en matemáticas o programación avanzada.
- Brinda gran eficiencia computacional, ya que se basa en la interacción de partículas que actualizan su posición y velocidad en cada iteración, permite una búsqueda

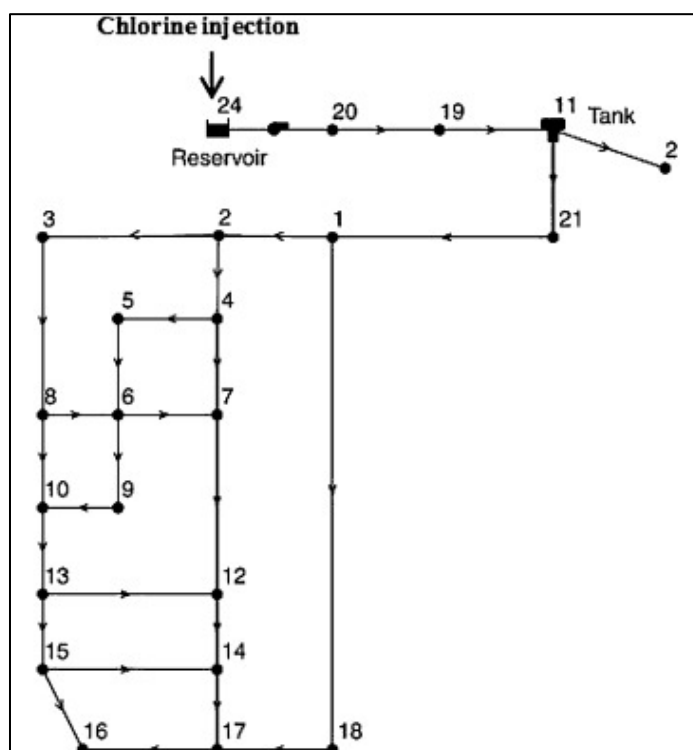
rápida y eficiente de soluciones óptimas, haciéndolo especialmente adecuado para problemas complejos con grandes espacios de búsqueda.

- Posee la capacidad de encontrar soluciones óptimas a nivel local y global, a través de la interacción y comunicación entre las partículas, el algoritmo puede explorar y explotar el espacio de búsqueda en busca de soluciones óptimas.
- Se adapta fácilmente a diferentes tipos de problemas, los parámetros del PSO, como la velocidad de las partículas, los límites de posición y las funciones de actualización, pueden ser ajustados según las características del problema.
- Puede ejecutar en múltiples procesadores o núcleos simultáneamente, esto acelera el tiempo de ejecución y permite manejar problemas más grandes y complejos. La paralelización del PSO también ayuda a explorar de manera más efectiva el espacio de búsqueda, mejorando así las posibilidades de encontrar soluciones óptimas.

Conforme a el estudio realizado por Minaee et al (2019), presentó una tecnología denominada GA-PSO, que emplea modelos hídricos basados en PSO, algoritmos genéticos AG y una combinación híbrida HGAPSO (Híbrido de Algoritmo Genético - GA y Optimización de Enjambre de Partículas - PSO) en la calibración la red de agua de Miraj (Figura 7) y modelado de la calidad del agua, para estimar el coeficiente de descomposición de la pared del cloro. En este modelo, GA crea una población de alta calidad, en donde los resultados se ordenan ascendente de acuerdo a su capacidad, y PSO es utilizado en objetivos específicos y globales en las poblaciones, la simulación se efectuó con la herramienta EPANET bajo la condición de estado estacionario y demandas constantes en los nodos durante el tiempo de estudio. Asimismo, se determinaron los parámetros de velocidad y concentración del cloro, diámetros y materiales de las tuberías, nivel del suministro y la capacidad del embalse de almacenamiento.

Figura 7

Red de agua del mundo real de Miraj para la calibración



Nota. Esquema de Miraj DWDS, tomado de (Minaee et al., 2019).

En esta investigación, se compararon los resultados alcanzados en el artículo de Munavalli et al, (2009) (la simulación en campo y los niveles de cloro presentes en los nodos), con los calculados en el estudio, como se muestran en la Tabla 3. Y de acuerdo con los resultados, los métodos utilizados en la investigación presentada por Minaee et al., demostraron tener un menor desajuste (Figura 8) y mayor optimización (Figura 9), donde se muestra una disminución de la suma del error cuadrático (SSE) y del error cuadrático medio (RMSE) en un 67,25% y un 82,5%, respectivamente, en comparación con los resultados obtenidos por Munavalli et al.

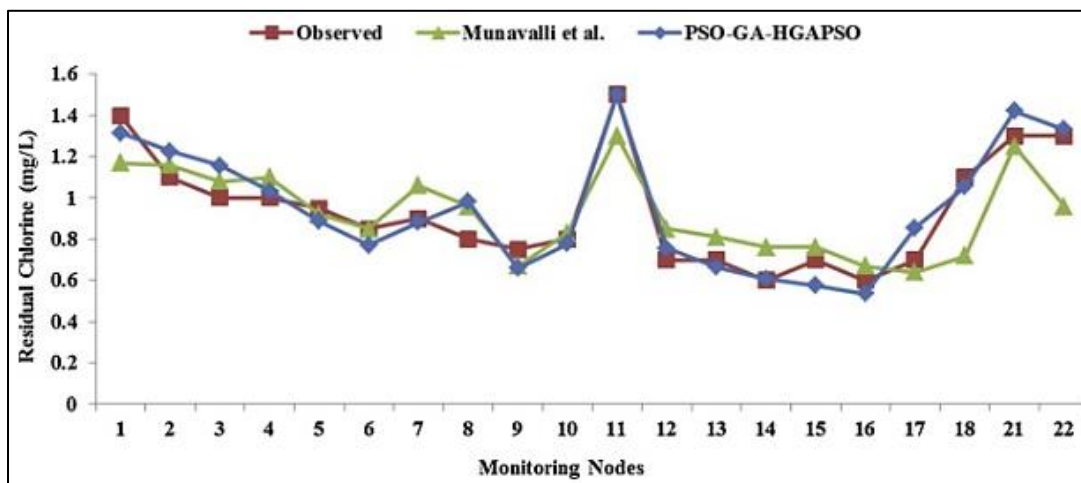
Tabla 3*Datos de calibración del coeficiente de deterioro de la pared*

Ubicación del cloro	Cloro residual observado	Cloro residual simulado	
		Métodos de calibración	
		Munavalli et al.	PSO, Ga y HGAPSO
1	1.4	1.170	1.316
2	1.1	1.160	1.226
3	1	1.080	1.156
4	1	1.100	1.032
5	0.95	0.920	0.887
6	0.85	0.850	0.771
7	0.9	1.060	0.882
8	0.8	0.960	0.981
9	0.75	0.670	0.659
10	0.8	0.830	0.778
11	1.5	1.300	1.5
12	0.7	1.850	0.755
13	0.7	0.850	0.663
14	0.6	0.810	0.606
15	0.7	0.760	0.575
16	0.6	0.760	0.534
17	0.7	0.670	0.854
18	1.1	0.640	1.056
21	1.3	0.720	1.422
22	1.3	1.250	1.334
Media ± DE	0.93 ± 0,26	0.92 ± 0.19	0.94 ± 0.28
SEE		0.507	0.166
RMSE		0.520	0.091

Nota. Esta tabla contiene los datos de calibración del coeficiente de deterioro de la pared., tomado de (Minaee et al., 2019).

Figura 8

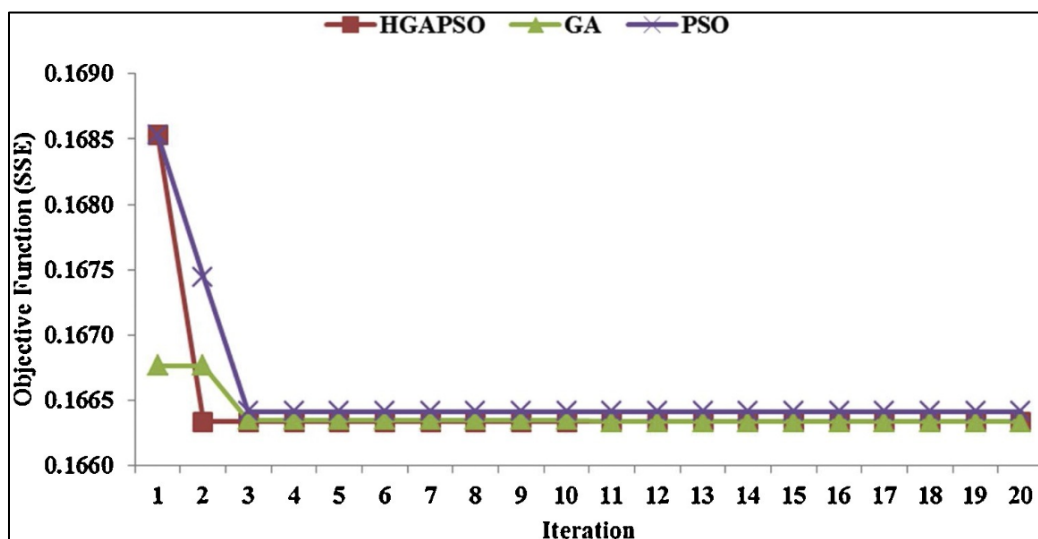
Niveles de cloro en los nodos bajo monitoreo obtenidos a partir de la observación, simulación de campo por Munavalli y los modelos propuestos (GA, PSO y HGAPSO)



Nota. La figura representa los dos niveles de cloro en los nodos bajo monitoreo obtenidos a partir de la observación, simulación de campo por Munavalli et al. y los modelos propuestos (GA, PSO y HGAPSO), tomado de (Minaee et al., 2019).

Figura 9

Curvas de convergencia de los tres métodos.



Nota. Esquema de Miraj DWDS, tomado de (Minaee et al., 2019).

Concluyendo, de acuerdo a los resultados que el método propuesto (HGAPSO, GA y PSO) Figura 8, muestran una mejora significativa en la precisión de la simulación y en la predicción de los niveles de cloro en los nodos en comparación con el estudio de Munavalli et al., como se ve en los nodos: 7, 12, 13, 14, 16, 18 y 22. Asimismo, como se observa en la Figura 9, el método HGAPSO supera a los algoritmos GA y PSO en términos de rendimiento, logrando encontrar la solución globalmente óptima de manera más exitosa y superando las limitaciones de los algoritmos constituyente. En el desarrollo de la calibración, se obtuvo un coeficiente de degradación de la pared de 1,233 m/día, lo que indica la velocidad a la que se produce la degradación de la pared del cloro en la red estudiada (Minaee et al., 2019).

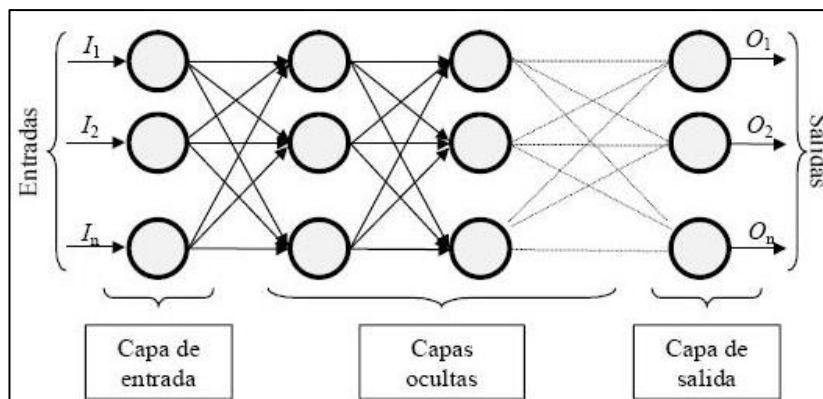
El algoritmo PSO presenta ventajas que lo convierten en una opción efectiva para la optimización de problemas, esto se debe a la simplicidad del algoritmo y a su capacidad de búsqueda de manera eficiente. Cuando se combina con algoritmos genéticos en un enfoque híbrido aprovecha las fortalezas de ambos algoritmos y puede conducir a una optimización más eficiente y efectiva, brindando resultados más precisos y rápidos.

Artificial Neural Network (ANN)

Según IBM (2021) la red neuronal es un modelo que imita como procesa la información el cerebro humano, consiste en una serie de unidades de procesamiento interconectadas que se asemejan a versiones abstractas de neuronas, las cuales se organizan en capas. Morocho (2008) afirma que el modelo de red neuronal se divide en tres partes principales: una capa de entrada que recibe los datos de entrada, una o varias capas ocultas, en el que se procesan los datos de manera interna y una capa de salida que genera los resultados. Las unidades de la red neuronal están conectadas mediante conexiones ponderadas, lo que significa que la información se propaga a través de la red, calculando y ajustando los pesos de conexión en cada iteración. Esto permite realizar predicciones basadas en los registros individuales y corregir los pesos de conexión inexactos. Este procedimiento se repite numerosas veces, perfeccionando las predicciones hasta alcanzar los criterios de parada establecidos. Los diferentes tipos de redes neuronales se distinguen por varios elementos, como el número y la disposición de las neuronas en las capas, la presencia de no linealidad en cada neurona, la estructura de interconexión entre las unidades, el algoritmo de entrenamiento utilizado y el comportamiento estático y dinámico de la red.

Figura 10

Diagrama res neuronal

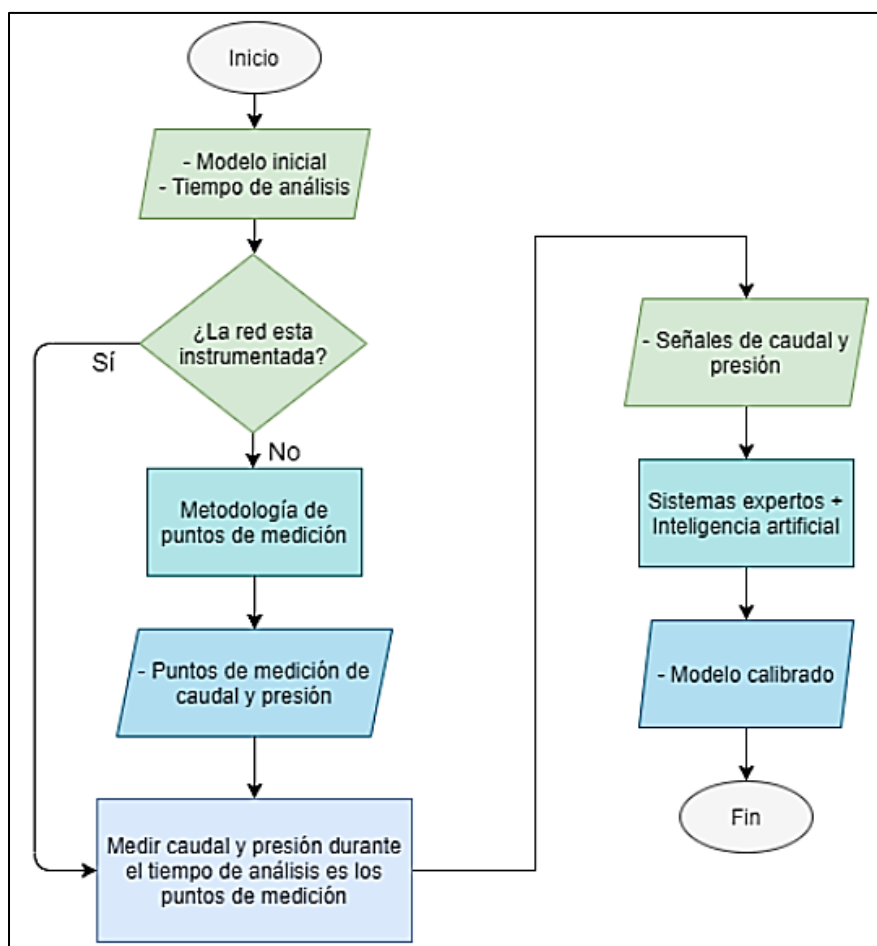


Nota. Esquema de una red neuronal, tomado de (Lourdes Morocho, 2008).

De acuerdo a Peña-Rojas & Flores-del-Pino (2014) las redes neuronales presentan algunas ventajas, entre ellas:

- Las redes neuronales pueden aprender y adaptarse a medida que se les presenta nueva información. Ajustan sus conexiones para mejorar su rendimiento y precisión en la tarea específica para la que han sido entrenadas.
- Son excelentes en el reconocimiento de patrones y la extracción de características relevantes de los datos. Identificando relaciones complejas y no lineales en los datos, lo que las hace útiles en problemas de clasificación, reconocimiento de imágenes, procesamiento del lenguaje natural, entre otros.
- Tienen la capacidad de manejar datos incompletos, generalizando a partir de ejemplos limitados y de manejar información parcial o con errores, lo que las hace robustas en entornos reales.
- Realizan cálculos de manera simultánea en múltiples unidades de procesamiento, lo que les permite un procesamiento en paralelo y una mayor eficiencia en el procesamiento de grandes volúmenes de datos.

Gómez, C. (2021), planteo desarrollar un algoritmo que permita la calibración de una RDA potable a través de diversas metodologías de inteligencia artificial. Mediante el análisis de sensibilidad (el cual implementa algoritmos genéticos), para el análisis de puntos de monitores y algoritmo EXACLTY comenzando con modelo inicial Figura 11, este algoritmo vincula los sistemas expertos con las redes neuronales es el más eficiente. El modelo inicial incorpora la información topológica, consumos de la red, las coordenadas x, y, z de los nodos, la conectividad de la red (nodos iniciales y finales en los tubos) y demandas conocidas en los nodos.

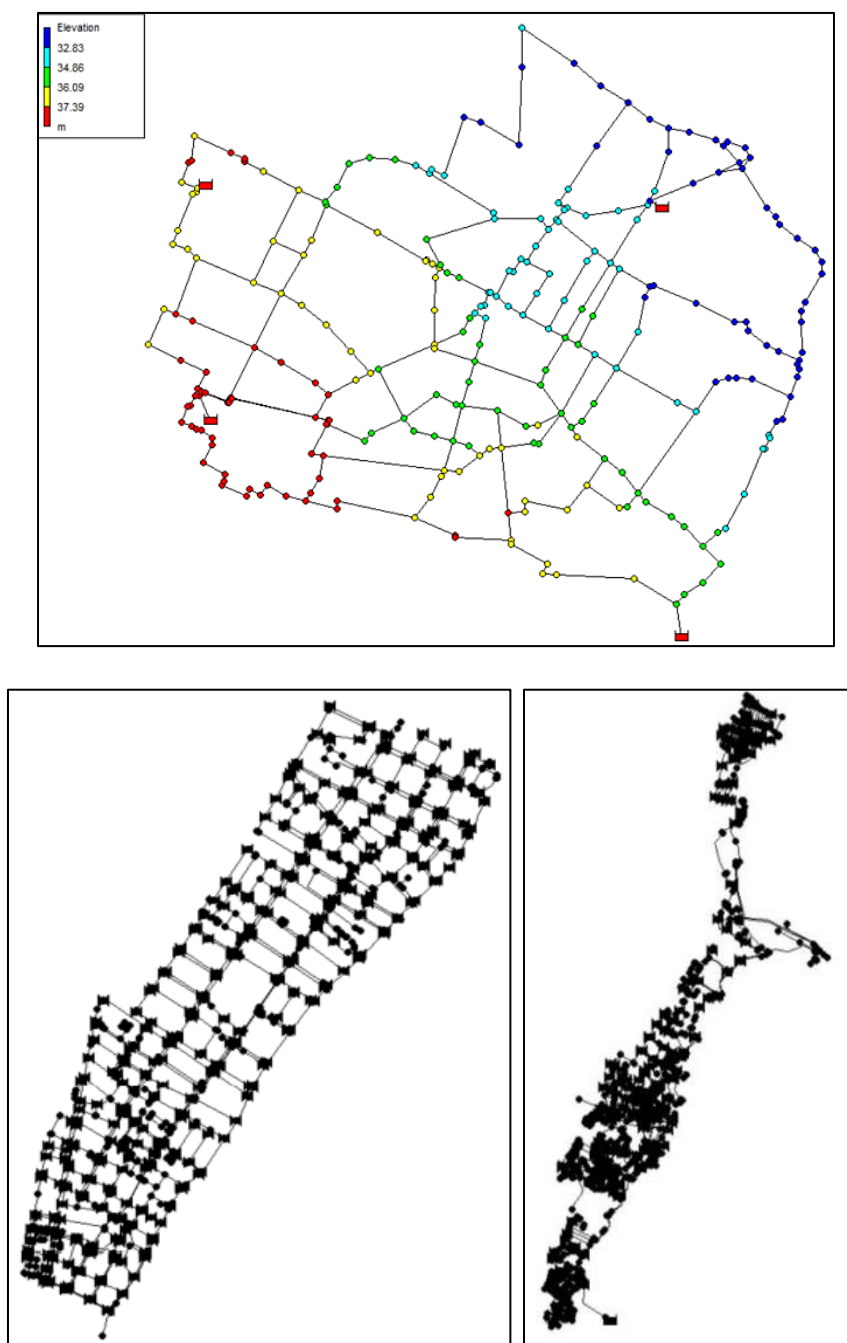
Figura 11*Metodología EXACTLY*

Nota. Diagrama de la metodología EXACTLY, tomado de (Gómez, 2021).

El modelo se implementó en la red patrón de Módena, (Figura 12), el sector 2 zona 18 de la red matriz de Bogotá y el sector 3 zona 15 de la red matriz de Bogotá.

Figura 12

Redes modeladas con el método Redes Neuronales

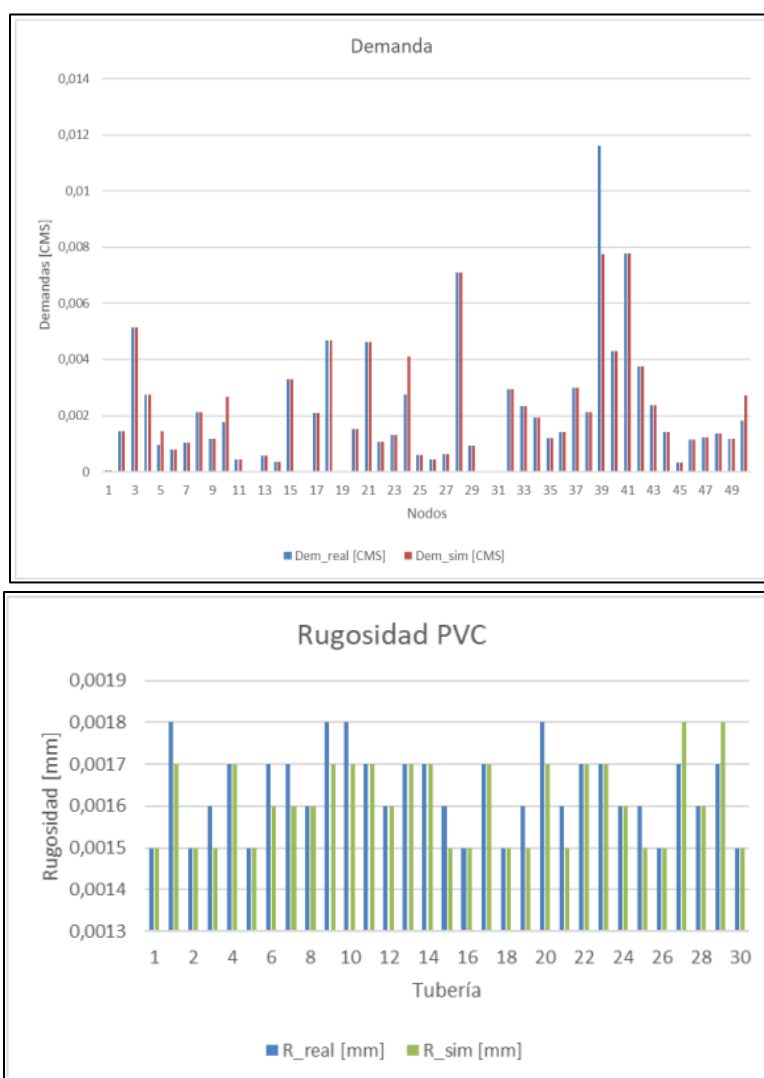


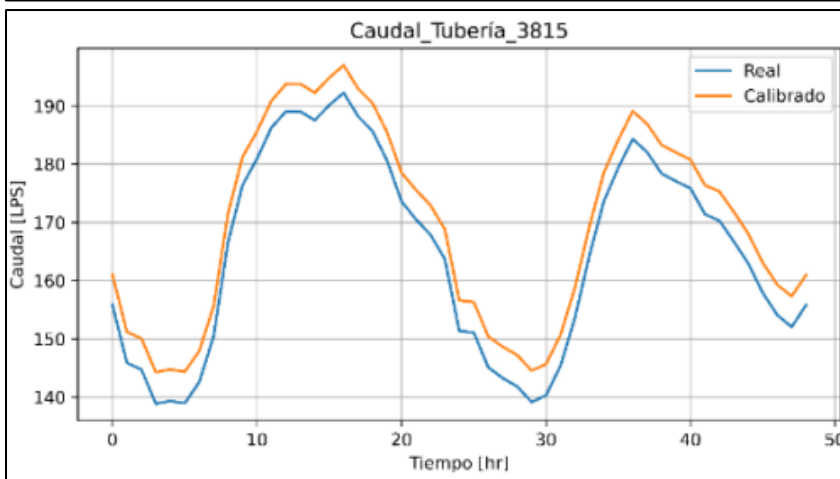
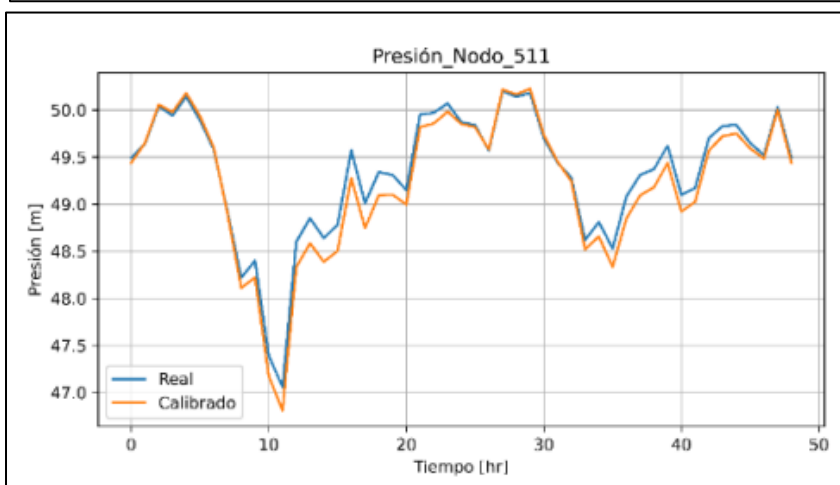
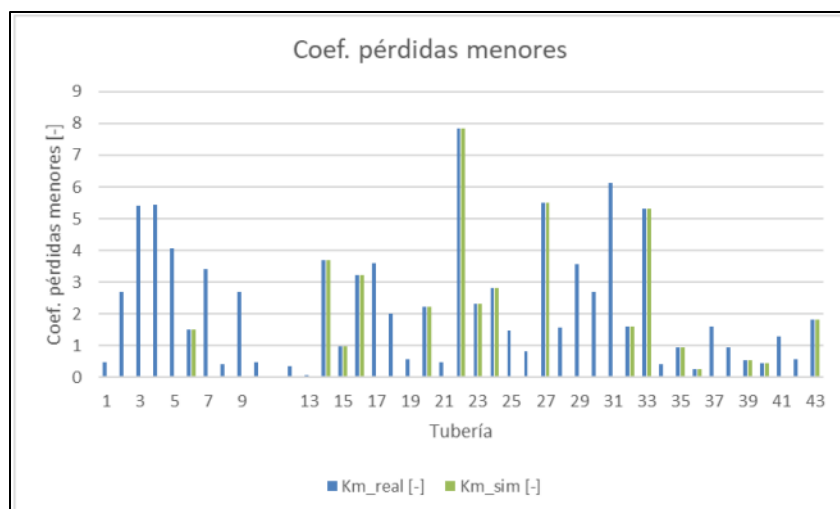
Nota. Las figuras representan la Red de Módena, Red del sector 2 zona 18, Red del sector 3 zona 15, tomado de (Gómez, 2021).

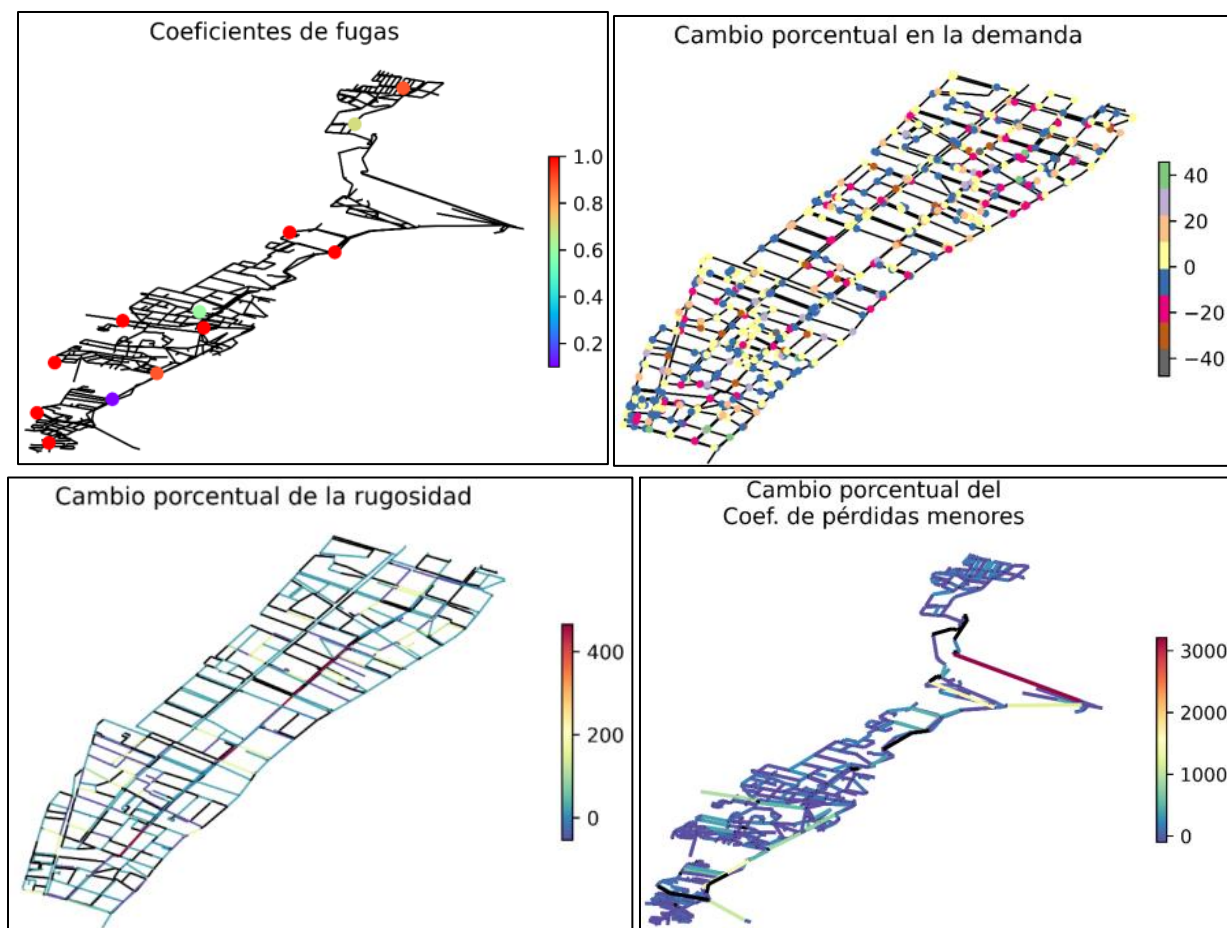
Asignando a lo largo de cada red patrones de demanda (al modelo inicial), con el objetivo de brindar variabilidad a los parámetros desconocidos; materiales y una edad a estos para analizar la sensibilidad y la variabilidad temporal de la rugosidad. Determinado los parámetros más idóneos para la red (Figura 13). Así mismo del algoritmo EXACTLY vincula los sistemas con las redes neuronales (ANN). Reduciendo los tiempos de ejecución y obteniendo mejores resultados.

Figura 13

Resultados de la calibración de las RDA







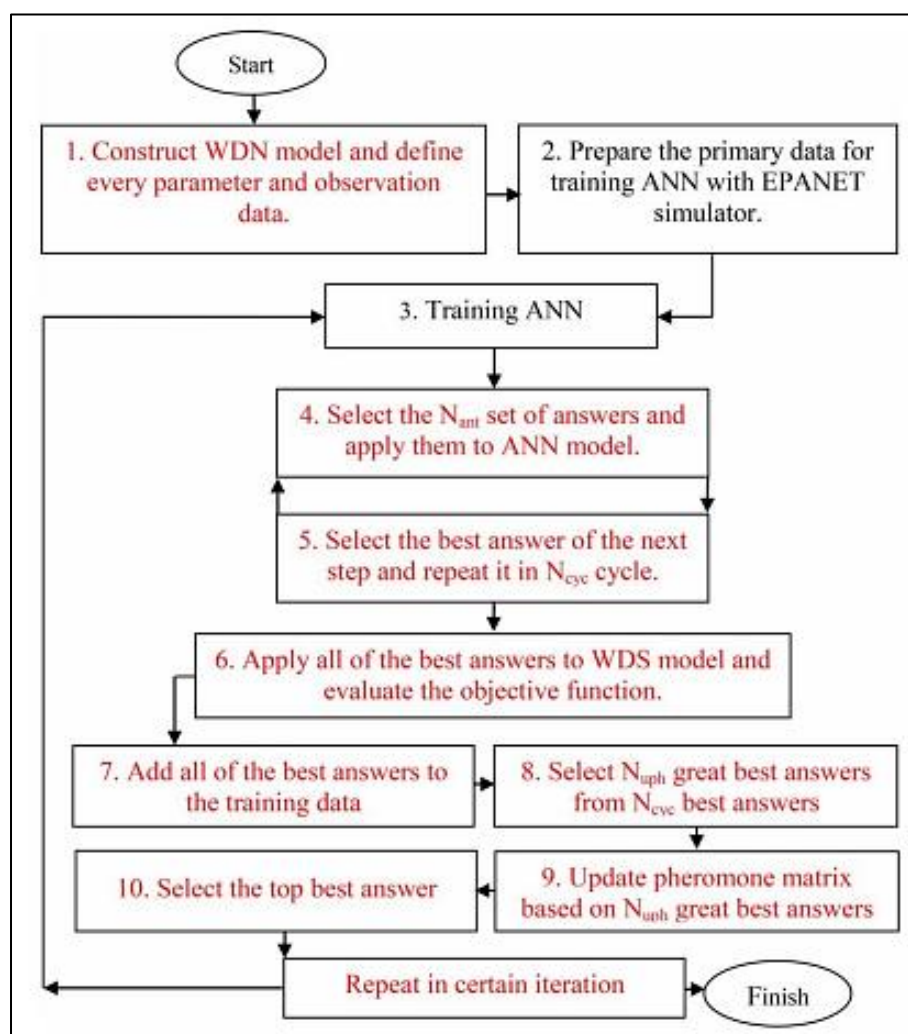
Nota. Resultados de la calibración de las redes modeladas, tomado de (Gómez, 2021).

Otra aplicación del método de red neuronales, es el ajuste de coeficientes de decaimiento de la pared de las paredes de la tubería: coeficiente de descomposición en masa (BD) y descomposición en la pared (WD), de acuerdo con el artículo presentado por Dini & Tabesh, (2017), En este caso, se combina el enfoque de redes neuronales con la técnica de Optimización de Colonias de Hormigas (ACO) para obtener un metamodelo (Figura 14), ejecutado el simulador EPANET, proponiendo 2 casos de estudio. El metamodelo desarrollado utiliza las redes neuronales para modelar la relación entre los coeficientes de decaimiento de la pared de la tubería y las variables de entrada correspondientes. Estas variables pueden incluir propiedades físicas de la tubería, condiciones ambientales, características del flujo, entre otros factores relevantes. La técnica de ACO busca y selecciona las combinaciones óptimas de variables de

entrada que maximicen el rendimiento del modelo de redes neuronales en términos de precisión y ajuste a los datos observados. Al combinar la capacidad de aprendizaje y adaptabilidad de las redes neuronales con la capacidad de búsqueda y optimización de ACO, se obtiene un metamodelo que permite ajustar de manera eficiente los coeficientes de decaimiento de la pared de las infiltraciones, mejorando así la precisión del modelo utilizado en la simulación y análisis de la RDA.

Figura 14

Diagrama del metamodelo



Nota. Diagrama de flujo del meta modelado, tomado de (Dini & Tabesh, 2017).

Caso 1: Se modela una red de tuberías de dos bucles (Tabla 4), utilizada anteriormente por otros autores. Los componentes del modelo se ajustan bajo los dos métodos, de forma que la calibración los calcule en el menor tiempo posible. Asimismo, se consideró la lenta distribución del cloro residual desde el reservorio a los nodos finales, de 72 horas con una concentración de 0,8mg/l. Posteriormente se realizó la calibración con un muestreo de 3 – 7 nodos, este paso se realiza mediante el modelo ACO y el metamodelo. Comparan los resultados de estos modelos concluyendo que este último es 63 veces más rápido.

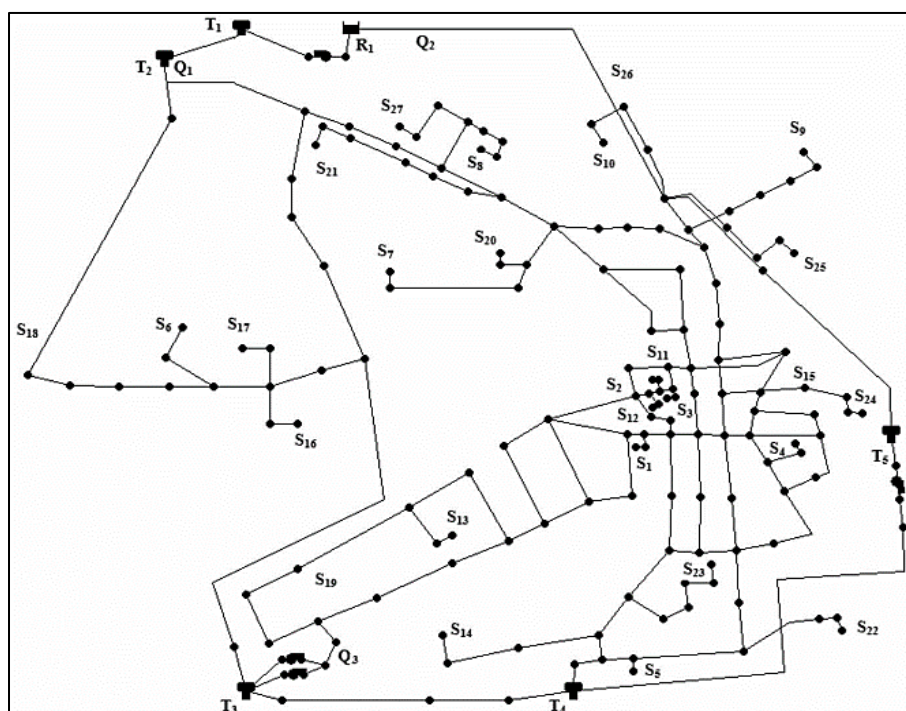
Tabla 4

Datos de la red

Característica de los tubos						
Características de los nodos			N ° L(m)	D (mm)	Rugosidad	DW (m/día)
No.	E (m)	BD (l/s)	1	450	130	-0.1
1	210	0	2	350	80	-0.6
2	150	27.8	3	350	130	-0.1
3	160	27.8	4	150	70	-0.7
4	155	33.4	5	350	100	-0.4
5	150	75	6	100	80	-0.6
6	165	91.7	7	350	100	-0.4
7	160	55.6	8	250	70	-0.7

Nota. Datos de la tubería de dos bucles, tomado de (Dini & Tabesh, 2017).

Caso 2: En este caso se estudió la RDA de la ciudad de Ahar, Azerbaiyán (Irán), esta red posee 192 tuberías, 169 nodos, 1 reservorio, 5 depósitos y 3 estaciones de bombeo. Con una planta de tratamiento con capacidad de 5000 m³. (Dini & Tabesh, 2017). Clasificando el WD en categorías y subcategorías limitadas basadas en los datos obtenidos en campo, así como el material diámetro y edad de la red. Obteniendo resultados más favorables en los resultados de las subcategorías.

Figura 15*Esquema de la RDA de Ahar*

Nota. Esquema de la RDA de la ciudad de Ahar, tomado de (Dini & Tabesh, 2017).

En consecuencia, el metamodelo propuesto en esta investigación se desempeñó de manera eficaz realizando muchas evaluaciones en poco tiempo. El modelo simple realizó 24.875 evaluaciones en 12,4 min, mientras el meta modelo realizó 108.600 evaluaciones en 118 seg, (Dini & Tabesh, 2017).

Se puede deducir que las redes neuronales es un método que ofrece varias ventajas, entre las cuales se encuentra la capacidad de tomar decisiones con asistencia humana limitada. Dado que son capaces de aprender y adaptarse automáticamente a partir de los datos de entrada. Esto significa que pueden detectar patrones, identificar tendencias y aprender relaciones complejas entre variables sin necesidad de una programación explícita o intervención humana constante. Esto permite que las redes neuronales tomen decisiones de manera autónoma en base a la información proporcionada. La combinación de redes neuronales con otros algoritmos permite

aprovechar las ventajas de ambos métodos, las redes neuronales pueden proporcionar capacidades de aprendizaje y reconocimiento de patrones, mientras que los algoritmos genéticos pueden ofrecer una búsqueda global y adaptabilidad en la optimización de soluciones o los ACO puede ofrecer una optimización global y adaptabilidad en la búsqueda de soluciones óptimas. Estas combinaciones pueden ser especialmente beneficiosa en problemas complejos donde se requiere tanto el procesamiento inteligente de datos como la búsqueda de soluciones óptimas.

Algoritmos Evolutivos

La aplicabilidad de los algoritmos evolutivos ha sido de gran ayuda en la optimización y búsqueda de soluciones de sistemas complejos, como lo demuestra un amplio número implementaciones y resultados de investigaciones que abarcan diferentes estudios. Los algoritmos evolutivos se basan en la evolución de los sistemas biológicos, con el objetivo de encontrar una tupla de valores $(x_1, \dots, x_n)$, tales que disminuyan una función específica $F(x_1, \dots, x_n)$. (J. García, 2014).

Algoritmos Genéticos (GA)

Basado en la teoría de evolución, disponiendo de una población (individuos de la misma especie), con diferentes características, evoluciona seleccionando a los individuos con mejores aptitudes, es decir, los individuos con mayor probabilidad de sobrevivir y reproducirse (fenotipo), para generar una nueva población que hereden los genes (genotipo), mejorando la especie. Asimismo, el algoritmo genético funciona, se genera una población inicial de individuos, posteriormente se seleccionan los criterios de clasificación, se seleccionan los individuos, si no cumple con los criterios de repite el proceso hasta encontrar la solución satisfactoria del problema (Gutierrez-Bahamondes et al., 2018).

Figura 16

Diagrama Algoritmo Genético



Nota. Esquema de flujo básico de un algoritmo genético, tomado de (Vega, 2007).

Los elementos y los métodos que componen el algoritmo son:

- Individuo: Representa una potencial solución al problema; contiene el genotipo (valores binarios) y fenotipo (números reales o caracteres).
- Generación: Grupo de individuos que se reproducen en un mismo periodo, en la iteración.
- Población: Número total de individuos.
- Método generación inicial: genera la población inicial de individuos.
- Método de selección: se utiliza para escoger los individuos que deberán reproducirse para formar la población siguiente.

- Método de reproducción: fusiona los genes de los individuos elegidos para reproducir los nuevos individuos.
- Método de mutación Con el cual se muta el genotipo de los individuos (mutación que se lleva a cabo en la naturaleza) (Vega, 2007).

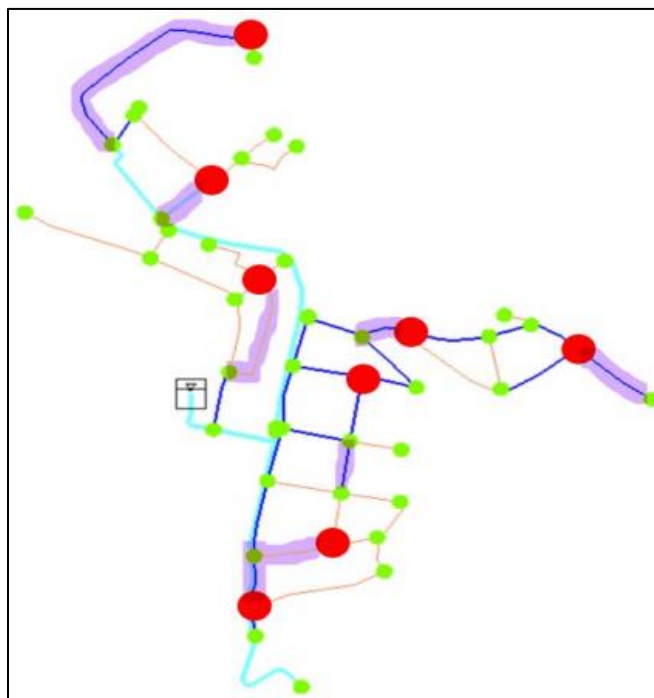
Los algoritmos genéticos presentan algunas ventajas:

- Buscan soluciones en un espacio de búsqueda amplio y encontrar soluciones óptimas o cercanas a las óptimas. Pueden superar los óptimos locales y buscar soluciones globales en problemas complejos y multidimensionales.
- Utilizan operadores de selección, cruce y mutación para generar nuevas soluciones y evolucionar hacia soluciones mejores con el tiempo. Pueden adaptarse a cambios en el entorno y en los objetivos de optimización.
- Pueden equilibrar la exploración de nuevas soluciones y la explotación de soluciones prometedoras. Pueden buscar soluciones en diferentes partes del espacio de búsqueda y aprovechar las soluciones prometedoras para refinar la búsqueda.
- Son eficientes en la optimización de problemas combinatorios, donde se busca encontrar la mejor combinación de elementos en un conjunto grande de posibles soluciones. Son ampliamente utilizados en problemas de planificación, asignación de recursos, diseño de circuitos, entre otros (Verrastro et al., 2009).

Ortega, E., (2020), realizo la calibración de las RDA de la Provincia de Huánuco, Perú, mediante el método de Algoritmos genéticos. Para la calibración de la red se establecieron nodos y tuberías específicas ubicadas estratégicamente, como se observa en la Figura 17, calculando en los nodos la presión y en las tuberías caudal.

Figura 17

Red de la Provincia de Huánuco, Perú



Nota. Red simulada en donde se inobserva la posición de nodos y tramos de tubería, tomado de (Ortega, 2020).

En el proceso de calibración Ortega (2020), sugiere utilizar el gradiente hidráulico en lugar de las presiones, ya que, el gradiente hidráulico varía continuamente con la distancia al embalse, mientras que las presiones varían en función de la altura del terreno. Del mismo modo, para realizar la calibración y el registro de los datos del gradiente hidráulico en los nodos y caudal en las tuberías, utilizo la herramienta Watercad Darwin Calibrator (los parámetros de esta herramienta son calculados mediante el modelo Algoritmos Genéticos). Los parámetros a calibrar en la RDA son: el coeficiente de rugosidad Tabla 5 y la gradiente hidráulica Tabla 6, solicitándole al programa mostrar los dos mejores resultados. En el proceso de calibración, se ajustó el valor de cada tubería, reduciendo su diámetro de 150 a 120 mm.

Tabla 5*Calibración de la rugosidad*

Grupo de ajuste		Hazen-Williams C
1	Tubería PVC 110mm	0.8
2	Tubería PVC 90 mm	0.8
3	Tubería PVC 75 mm	0.8

	Grupo de ajuste	Nodo	Rugosidad original	Rugosidad ajustada
1	Tubería PVC 110mm	T-13	150.000	120.000
2	Tubería PVC 110mm	T-13	150.000	120.000
3	Tubería PVC 110mm	T-49	150.000	120.000
4	Tubería PVC 110mm	T-50	150.000	120.000
5	Tubería PVC 110mm	T-15	150.000	120.000
6	Tubería PVC 110mm	T-14	150.000	120.000
7	Tubería PVC 110mm	T-3	150.000	120.000
8	Tubería PVC 110mm	T-12	150.000	120.000
9	Tubería PVC 90 mm	T-28	150.000	120.000
10	Tubería PVC 90 mm	T-59	150.000	120.000
11	Tubería PVC 90 mm	T-16	150.000	120.000
12	Tubería PVC 90 mm	T-53	150.000	120.000
13	Tubería PVC 90 mm	T-36	150.000	120.000
14	Tubería PVC 90 mm	T-54	150.000	120.000
15	Tubería PVC 90 mm	T-44	150.000	120.000
16	Tubería PVC 90 mm	T-40	150.000	120.000
17	Tubería PVC 90 mm	T-46	150.000	120.000
18	Tubería PVC 90 mm	T-33	150.000	120.000
19	Tubería PVC 90 mm	T-27	150.000	120.000
20	Tubería PVC 90 mm	T-22	150.000	120.000
21	Tubería PVC 90 mm	T-29	150.000	120.000

Nota. Tabla de valores iniciales y ajustados del coeficiente de rugosidad en las tuberías, tomado de (Ortega, 2020).

Tabla 6

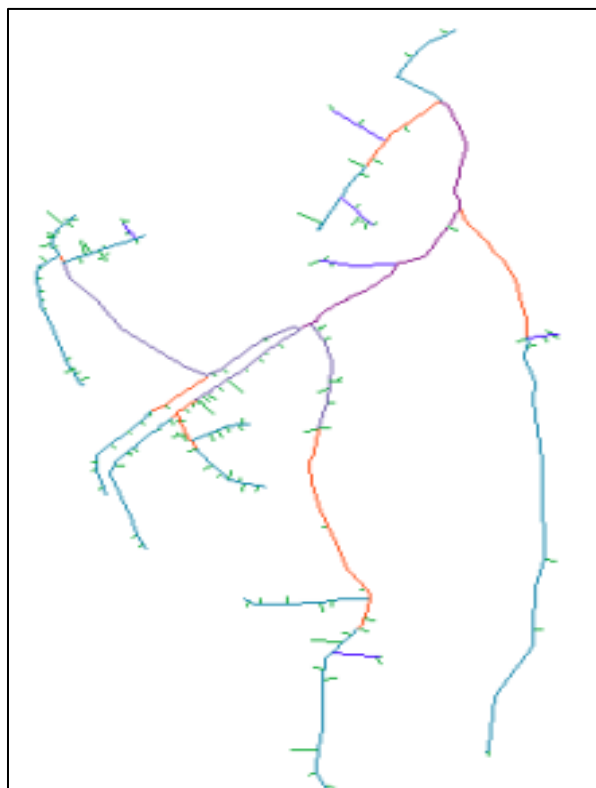
Calibración de la gradiente hidráulica

	Instantánea de datos de campo	Nodo	Grado hidráulico observado (m)	Grado hidráulico simulado (m)	Diferencia (m)
1	Calibración-GH y Caudal	N-13	2037.660	2036.560	-1.100
2	Calibración-GH y Caudal	N-33	2035.790	2036.560	0.770
3	Calibración-GH y Caudal	N-37	2034.720	2036.560	1.840
4	Calibración-GH y Caudal	N-34	2034.390	2036.540	2.150
5	Calibración-GH y Caudal	N-39	2037.760	2036.540	-1.220
6	Calibración-GH y Caudal	N-6	2062.440	2064.570	2.130
7	Calibración-GH y Caudal	N-22	2033.760	2036.430	2.670
8	Calibración-GH y Caudal	N-32	2034.670	2036.410	1.740

Nota. Tabla de resultados de calibración de la gradiente hidráulica, tomado de (Ortega, 2020).

En conclusión, el modelo hidráulico calibrado funciona como herramienta para la correcta gestión de los recursos hídricos, identificando fallos, permitiendo el entendimiento y solución cuantitativa de problemas para tomar una elección acertada tanto en la gestión técnica y económica como en la gestión social. En el desarrollo de la calibración óptima, se realizaron ajustes en el coeficiente de rugosidad y en la demanda del sistema. Específicamente, se redujo el valor de la rugosidad de las tuberías de 150 a 120 mm, aplicando un factor de ajuste de 0,80 mm a todos los diámetros existentes. Con la finalidad de mejorar la precisión y la correspondencia entre los datos observados y los simulados en la RDA. (Ortega, 2020).

Briceño & Infantes, (2019), llevó a cabo la calibración del coeficiente de rugosidad y la verificación de las presiones tanto in situ como simuladas en la RDA de Huamachuco, Perú. Para llevar a cabo este proceso, se obtuvo la herramienta Darwin Calibrator (waterCAD).

Figura 18*Red de distribución de Huamachuco, Perú*

Nota. RDA potable ubicado en el Caserío de Sanjapampa –Huamachuco, tomado de (Briceño & Infantes, 2019).

El proceso de calibración realizado en el estudio de Briceño & Infantes (2019) constó de varias etapas. En primer lugar, se llevó a cabo una calibración preliminar para establecer y modificar las fuentes de incertidumbre que causaron las mayores discrepancias entre los resultados del modelo y los valores calculados in situ. Estas fuentes de error incluyen el coeficiente de rugosidad de la red, las demandas de agua, los diámetros y longitudes de las tuberías, así como los equipos de calibración utilizados. Posteriormente, realizó una calibración básica para ajustar el coeficiente de rugosidad y lograr una concordancia adecuada entre las presiones medidas in situ y las presiones simuladas en el simulador.

Por último, realizó la calibración optimizada, esta etapa permitió ajustar los parámetros de manera más exacta, en función de las presiones medidas en campo. El resultado de esta calibración optimizada fue una estimación calibrada del coeficiente de rugosidad que reflejaba de manera más precisa las condiciones hidráulicas del sistema.

Tabla 7

Calibración optimizada- presiones calibradas

Resultados simulados					
	Instantánea de datos de campo	Nodo	Grado hidráulico observado (m)	Grado hidráulico simulado (m)	Diferencia (m)
1	Calibración del coeficiente	Z-25	3252.560	3258.701	6.141
2	Calibración del coeficiente	Z-19	3248.927	3258.748	9.821
3	Calibración del coeficiente	Z-17	3249.619	3258.846	9.227
4	Calibración del coeficiente	Z-92	3256.886	3258.882	1.996
5	Calibración del coeficiente	Z-86	3257.614	3258.854	1.240
6	Calibración del coeficiente	Z-94	3258.452	3258.979	0.526
7	Calibración del coeficiente	Z-42	3253.755	3257.221	3.466
8	Calibración del coeficiente	Z-84	3254.706	3258.813	4.107
9	Calibración del coeficiente	Z-88	3257.751	3258.875	1.124
10	Calibración del coeficiente	Z-62	3252.841	3257.428	4.587
11	Calibración del coeficiente	Z-82	3253.429	3258.799	5.369
12	Calibración del coeficiente	Z-44	3253.929	3257.205	3.276
13	Calibración del coeficiente	Z-56	3251.667	3257.308	5.640
14	Calibración del coeficiente	Z-90	3257.751	3258.883	1.131

Nota. Tabla de resultados de la calibración optimizada- presiones calibradas, tomado de

(Briceño & Infantes, 2019).

Según el estudio realizado por Briceño & Infantes (2019), la herramienta Darwin Calibrator resultó ser una herramienta eficaz para acelerar el proceso de calibración RDA. Gracias a las numerosas iteraciones de los algoritmos, permite realizar una calibración rápida y

precisa. Ahora bien, es fundamental tener en cuenta que los resultados obtenidos dependen en gran medida de la calidad de la información obtenida en campo, especialmente de las mediciones de presión. En el caso de la RDA estudiada, se calibraron el coeficiente de rugosidad en un valor de 142,5, que representa el 95% del valor fijado por la norma peruana (150). Esto significa que la pérdida de presión máxima producida en la RDA sería de 0,30 m.c.a, lo cual se considera un valor mínimo. Es importante tener en cuenta que el coeficiente de rugosidad es un factor determinante en la incidencia de pérdidas de carga en la red. Además, observaron que la red simulada y calibrada posee presiones inferiores a la mínima (5mca) permitida por la norma peruana OS 0.50 y la presión máxima en la red es de 42.7 m.c.a. no supera la máxima exigida: 60 m.c.a.

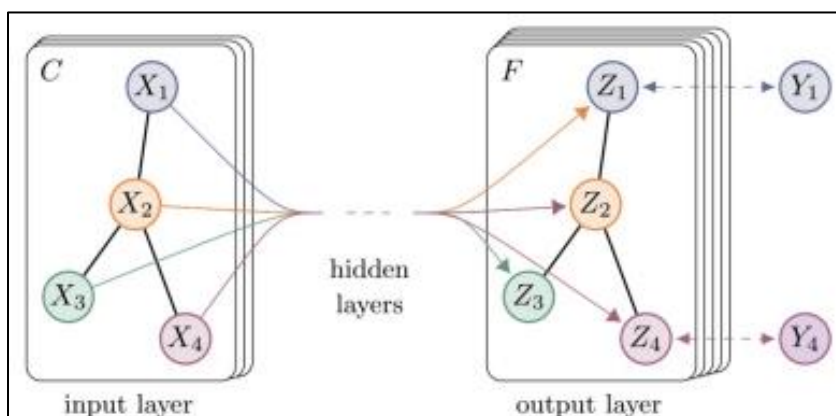
Los algoritmos genéticos poseen gran capacidad de buscar soluciones en un espacio de búsqueda local y global y encontrar soluciones óptimas en problemas complejos y multidimensionales. Debido a que posee operadores de selección, cruce y mutación para originar nuevas soluciones y evolucionar hacia soluciones mejores con el tiempo. Adaptándose a cambios en el entorno y en los objetivos de optimización.

Graph Convolutional Networks (GCN)

Las redes convolucionales gráficas (GCN) son una red neuronal multicapa que opera directamente en un gráfico e induce vectores de incrustación de nodos en función de las propiedades. Son un tipo de estructura de datos que proporciona un modelo para un conjunto de nodos y sus bordes, que representan objetos y sus relaciones. El estudio de las GCN se centra en tareas como la clasificación de nodos, las predicciones de enlaces de nodos y la agrupación de nodos. La fortaleza de este método en el uso de la información relacional de los grafos: en lugar de sólo considerar las instancias individualmente (los nodos y sus atributos), las relaciones entre ellas también se explotan (las aristas). Dicho de otra manera: las instancias no se tratan de forma independiente; utilizamos una cierta forma de datos, donde los efectos de la red como la homofilia apoyan la clasificación (Cuturi & Padula, 2020).

Figura 19

Diagrama Graph Convolutional Networks



Nota. Representación esquelética de una GCN de varias capas para el aprendizaje semi-supervisado con C canales de entrada y F mapeos de features en la capa de salida. La estructura del grafo (las aristas mostradas como líneas negras) se compone entre las capas. Las etiquetas se denotan con Y_i , tomado de (Cuturi & Padula, 2020).

Un grafo $G = (V, E)$ es la configuración matemática que consiste en un grupo de vértices V (nodos) y un grupo de aristas E (enlaces), donde los elementos de E son pares no ordenados de vértices, estas aristas son subconjuntos de vértices de dos elementos (cada arista está unida a dos vértices). Aplicado este método a una RDA se puede considerar que el consumidor y los nodos del embalse como vértices (V), las tuberías, bombas y válvulas de la red como aristas (E) (Shekofteh et al., 2020).

Algunas de las ventajas de las redes convolucionales gráficas son:

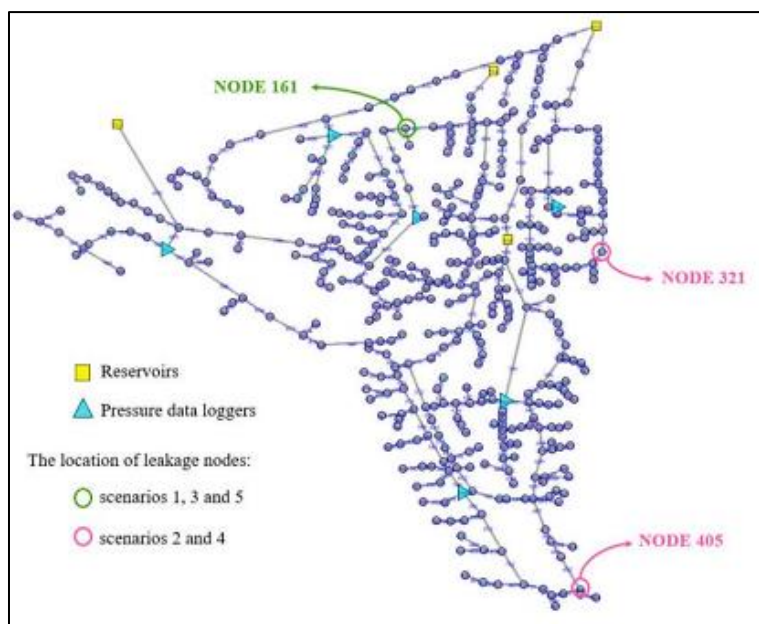
- Las redes convolucionales gráficas están diseñadas específicamente para trabajar con datos estructurados, como grafos o redes, que contienen relaciones complejas entre los nodos. Estas redes pueden capturar y procesar eficientemente la información estructural y topológica de los grafos, lo que las hace ideales para problemas que involucran relaciones entre entidades, como redes sociales, sistemas de recomendación y biología molecular.
- Las GCNN son invariantes a la permutación de los nodos en un grafo. Esto significa que el orden de los nodos en la representación de entrada no afecta el resultado de la red, lo que las hace más robustas y flexibles en comparación con otros modelos que dependen del orden de los datos.
- Utilizan técnicas de propagación de información eficientes, como la propagación hacia adelante en grafos dispersos. Esto permite un procesamiento rápido y escalable de grandes conjuntos de datos estructurados o basados en grafos.
- Pueden manejar grafos de tamaño variable, lo que significa que pueden adaptarse a diferentes tamaños y estructuras de grafos sin necesidad de un preprocesamiento o redimensionamiento complicado. Esto es particularmente útil en aplicaciones

donde los grafos pueden tener un número variable de nodos o conexiones (Casado, 2022).

En el artículo presentado por Shekofteh et al., (2020), en donde pretende identificar las fugas en las RDA en la red de Balerna, (Figura 20) presentado cinco escenarios de fuga. Dividiendo la red en partes para aplicar la teoría de grafos y la parte con fugas las identifica usando los resultados de los registradores de presión y la red neuronal. La red estudiada posee 4 embalses, 443 nodos y 454 tuberías.

Figura 20

RDA de Balerna aplicando el método GCN



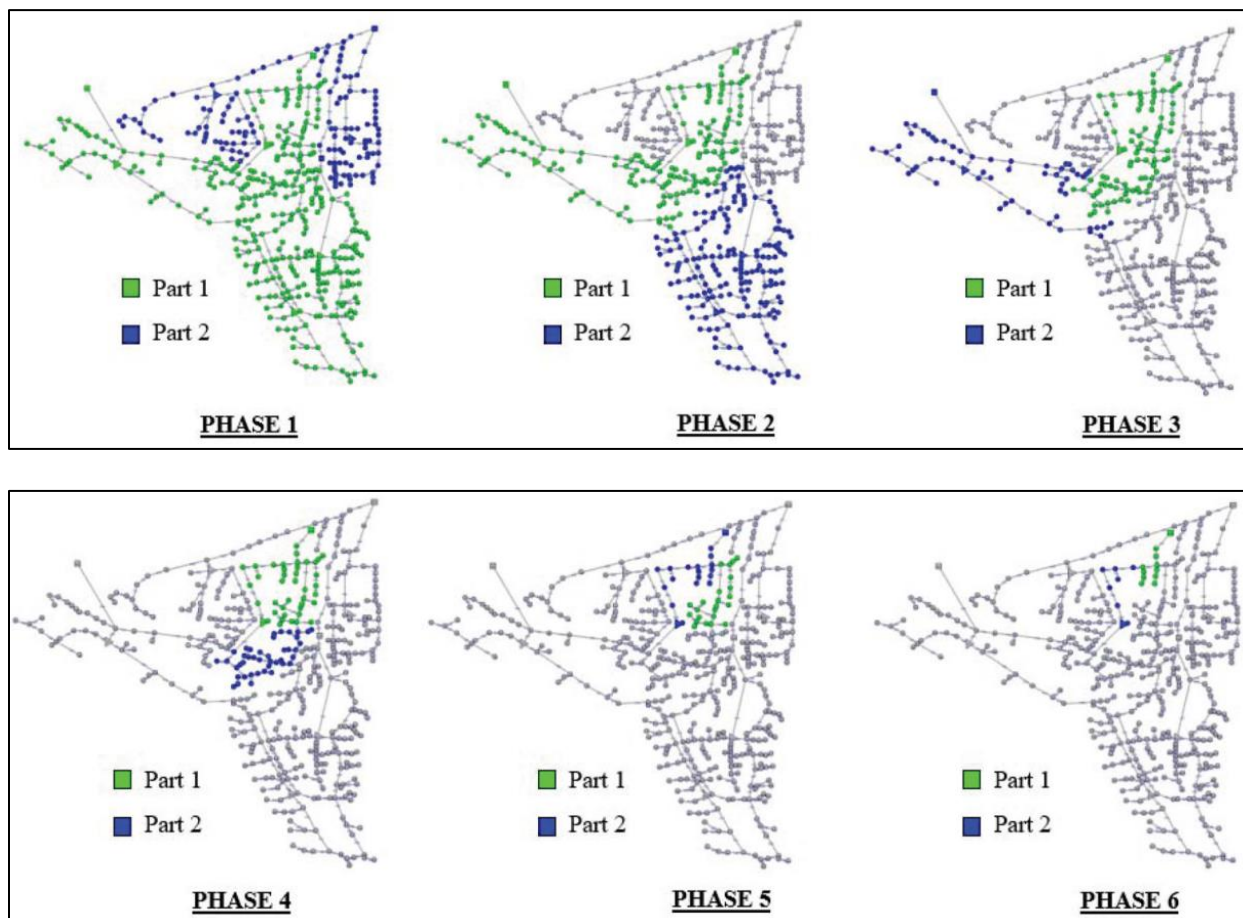
Nota. Red de agua de Balerna con la ubicación de los registradores de presión y las fugas, tomado de (Shekofteh et al., 2020).

Escenario 1: En esta fase se divide la red en dos partes con el algoritmo GN (Girvan-Newman, algoritmo introducido en la teoría de grafos para la agrupación de gráficos), estas partes se subdividen para emplear la unión de la teoría de grafos con redes neuronales artificiales (ANN), para que este suministre los datos de los valores de la fuga pronosticada. Posteriormente

se repite el proceso 6 veces de división de la red en dos partes identificando la parte de la fuga, basándose en los resultados alcanzados se ubican con éxito el área de la fuga.

Figura 21

Fases de la partición de la red (Escenario 1 y 3)

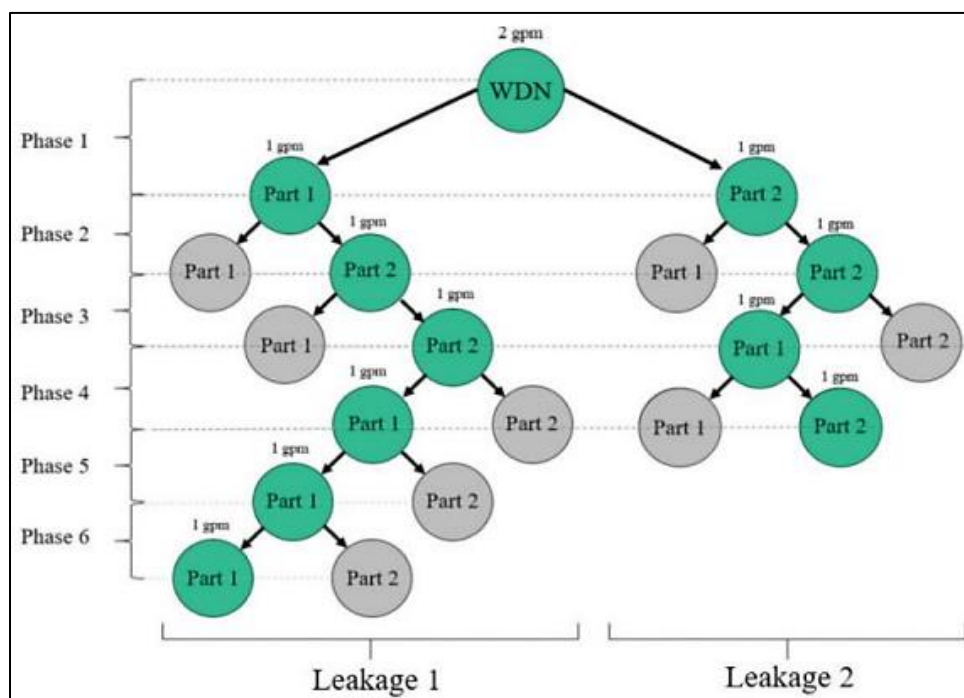


Nota. Figura de las diferentes fases de partición de la red para el escenario 1 y el escenario 3 (fases 1, 2 y 3 únicamente), tomado de (Shekofteh et al., 2020).

Escenario 2: en esta se asumen dos fugas simultaneas y se divide la red en dos partes y empleado el método ANN para obtener los resultados, a partir de estos se observa que parte tiene fugas como se observa en la Figura 22, hasta llegar a una fase 6.

Figura 22

Ruta de selección para el Escenario 2



Nota. Figura de las rutas de selección de ruta para las dos partes de la red para el escenario 2, tomado de (Shekofteh et al., 2020).

Escenario 3 y 4: Se consideran los escenarios 3 y 4 (son similares a los 1y 2) con las incertidumbres y de acuerdo a los resultados obtenidos se determina la edad de la fuga.

Finalmente, el escenario 5 el cual es igual al 1 con la suposición de las presiones de campo no son precisas y un 10% de incertidumbre, pero este escenario solo se valida hasta la fase 3. En conclusión, los resultados el modelo ANN obtuvo buena precisión al detectar las áreas de fugas y los resultados de incertidumbre tiene un rango aceptable, ya que el área de la fuga final aumentaba. Al contrario de los métodos anteriores, en el método propuesto no se necesita caudalímetro ni medición de caudal.

Las redes convolucionales gráficas son una herramienta eficiente en el análisis de datos estructurados y ofrecen ventajas específicas en el manejo eficiente de grafos, extracción de

características adaptadas al grafo y aprendizaje de representaciones de nodos y grafos. Ofrecen varias ventajas en comparación con otros modelos de redes neuronales en la tarea de análisis de datos estructurados, como grafos o redes.

Conclusiones

En la monografía desarrollada se planteó exponer algunas de los métodos hidráulicos utilizados en la calibración de RDA. Realizando una revisión bibliográfica con referente a la calibración de las redes basada en la simulación precisa de una red existente, contemplando algunos conceptos de las generalidades de las redes procedimiento: elementos físicos que tiene una red, topología, tipos de distribución; las variables o parámetros que son de suma importancia para la calibración de la red como: el coeficiente de rugosidad, perdidas, fugas y demandas; también se consideraron las posibles fuentes de error en los modelos hidráulicos de acuerdo a autores como Ormsbee, Lingireddy, la AWWA y waslki; los métodos y softwares de calibración, la construcción de los modelos de calibración; así como la aplicación de estos en diferentes investigaciones referentes en la calibración de las RDA.

Se pudo observar que el algoritmo más empleado en la calibración de redes son los algoritmos genéticos y combinado con otros algoritmos, asimismo algunos softwares computacionales como waterCAD y REDES, los cuales están apoyados en el uso de GA. En donde los híbridos de estos métodos tienen un rendimiento es superior, como de acuerdo al estudio realizado por Minaee et al. (2019). Así como la combinación de teoría de grafos y ANN en la detección de fugas, el método planteado evita el uso de caudalímetro ni medición de caudal reduciendo tiempo y costos en la calibración de las RDA de acuerdo a el artículo realizado por Shekofteh et al. (2020).

Infiriendo que la combinación entre métodos es la manera más eficiente y precisa para la calibración de RDA, permite aprovechar las ventajas de cada método y superar las limitaciones individuales, capturando de manera más precisa y detallada las características y dinámicas complejas de la red, proporcionando resultados más precisos, detallados y confiables en la

simulación y predicción del comportamiento de esta. Lo que permite tener una base sólida para la toma de decisiones en la gestión y planificación de las RDA ante diferentes escenarios y opciones, optimizando así el rendimiento y la eficiencia de las redes hidráulicas. Es fundamental destacar que la selección y aplicación de un modelo hidráulico híbrido dependerá de las características y objetivos específicos del sistema de agua, así como de los recursos y datos disponibles

Concluyendo que los métodos de calibración de RDA son de gran utilidad ante cualquier actuación a realizar en la red, brindando mayor velocidad y precisión en la obtención de datos, tal como, se observó en los resultados de la investigación elaborada por Briceño & Infantes (2019), en algunos puntos de la red, las presiones eran menores a las que exigidas por la norma y plantearon de acuerdo a esto unas mejoras a la red para que esta funcione óptimamente.

Asimismo, se deben considerar que para una adecuada calibración es de gran importancia la recolección de datos de la red, los cuales deben poseer consistencia y fiabilidad. Asimismo, es necesario realizar el ajuste de los parámetros de la red: el coeficiente de rugosidad, las demandas, los diámetros y las longitudes de la red, las pérdidas menores, las fugas, los consumos, etc., ya que, estos factores también afectan los resultados de la simulación.

Bibliografía

- Aldaz, I. (2020). *MODELADO HIDRÁULICO Y CALIBRADO DE LA RED DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE DE LA COMARCA DE PAMPLONA*.
<https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/146894/Aldaz%20-%20Modelado%20hidr%C3%A1ulico%20y%20calibrado%20de%20la%20Red%20de%20Abastecimiento%20de%20agua%20potable%20de%20la%20Comarca....pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- ANEXO 2 DOCUMENTO COMPILATORIO DEL RAS, Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS en virtud de lo establecido en la Resolución 330 de 2017 y modificaciones realizadas mediante la expedición de la Resolución 799 de 2021 y Resolución 908 de 2021. (2022).
<https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/anexo-2-articulado-definitivo-rev-sspd-1.pdf>
- AWWA. (2013). Committee Report: Defining model calibration. *JOURNAL AWWA*, 105(7), 60–63. <https://doi.org/10.5942/jawwa.2013.105.0101>
- Briceño, J., & Infantes, D. (2019). *INFLUENCIA DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD EN LA PERDIDA DE PRESION DE LA RED DE DISTRIBUCION DE AGUA POTABLE EN EL CASERIO DE SANJAPAMPA-HUAMACHUCO*” [Universidad Privada Antenor Orrego (UPAO)].
https://repositorio.upao.edu.pe/bitstream/20.500.12759/7103/1/REP_INCI_JHORDEN.BRICE%c3%91O_DANIEL.INFANTES_INFLUENCIA.COEFICIENTE.RUGOSIDAD.PERDIDA.PRESI%c3%93N.RED.DISTRIBUCI%c3%93N.AGUA.POTABLE.CASER%c3%8dO.SANJAPAMPA.HUAMACHUCO.pdf

Cabarcas, D., & Barrios, T. (2020). *Formulación de un Sistema de Abastecimiento de Agua por Método de Bombeo*.

<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/25173/BarriosCanoTaniaAlejandra2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Casado, N. (2022). *REDES NEURONALES CONVOLUCIONALES Y APLICACIONES* [UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID].

<https://eprints.ucm.es/id/eprint/74259/1/natalia-casado-redes-neuronales-tfg.pdf>

Castro, R., & Ruben, P. (2009). *Saneamiento rural y salud Guía para acciones a nivel local* (OPS). <https://iris.paho.org/handle/10665.2/52823>

Conceptos Básicos de WATERCAD. (n.d.). Retrieved May 26, 2023, from

<https://cmeducativa.es/curso-de-watercad/conceptos-basicos/>

Cuchango, H. E. E., Iván, J., & Esmeral, S. (2014). *Vortex Particle Swarm Optimization with Individual and Group Search*. 18(42), 24–37.

Cuturi, M., & Padula, F. (2020). *Comportamiento de Graph Convolutional Networks (GCN) ante datos de ruido* [Universidad de la Republica].

<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/25235/1/CP20.pdf>

Dini, M., & Tabesh, M. (2017). Water distribution network quality model calibration: a case study – Ahar. *Water Supply*, 17(3).

Eadic. (2016). <https://eadic.com/blog/entrada/watercad-el-software-para-obras-hidraulicas/>

García, J. (2014). “*ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS EVOLUTIVOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE SIMULACIONES EN INGENIERÍA CIVIL*.” [Universidad

Católica San Antonio]. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1401/1401.5054.pdf>

- García, M. (2006). *MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE REDES HIDRÁULICAS A PRESIÓN MEDIANTE HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS* [UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA CIVIL].
https://www.upct.es/hidrom/publicaciones/Tesis_pfc/PFC_MMarGracia_2006.pdf
- Gomez, C. (2021). *Calibración de redes de distribución de agua potable a través de inteligencia artificial Cristian Camilo Gómez Cortés* [Universidad de los Andes].
<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/53823/24844.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gutierrez-Bahamondes, J. H., Mora-Melia, D., Iglesias-Rey, P. L., & Martinez-Solano, F. J. (2018). *HAWANET: NUEVO SOFTWARE PARA LA OPTIMIZACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE UTILIZANDO ALGORITMOS EVOLUTIVOS*.
https://www.ina.gob.ar/congreso_hidraulica/resumenes/LADHI_2018_RE_623.pdf
- IBM. (2021). *El modelo de redes neuronales - Documentación de IBM*.
<https://www.ibm.com/docs/es/spss-modeler/saas?topic=networks-neural-model>
- Lourdes Morocho. (2008). *REDES NEURONALES (RNA) | Advanced Tech Computing Group UTPL*. <https://advancedtech.wordpress.com/2008/08/07/redes-neuronales-rna/>
- Martínez, C. (2020). *DISEÑO DE SISTEMA DE BOMBEO A BASE DE ENERGÍA SOLAR PARA SUMINISTRO DE AGUA* [UNIVERSIDAD VERACRUZANA MAESTRÍA EN INGENIERÍA APLICADA].
https://www.uv.mx/veracruz/miaplicada/files/2021/07/Tesis_Carlos-Alberto-Martinez-Farias.pdf
- Minaee, R., Afsharnia, M., Moghaddam, A., Ebrahimi, A. A., Askarishahi, M., & Mokhtari, M. (2019). Calibration of water quality model for distribution networks using genetic

algorithm, particle swarm optimization, and hybrid methods. *MethodsX*, 6, 540–548.

<https://doi.org/10.1016/J.MEX.2019.03.008>

Molía, R. (n.d.). *Módulo: Abastecimiento y saneamiento urbanos*. Escuela de Negocios .

Molina, A., & Stephenson, X. (2014). *METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN*

PRELIMINAR DE MODELOS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA MEDIANTE LA UTILIZACIÓN CONJUNTA DE DEMANDAS Y CONSUMOS DEPENDIENTES DE LA PRESIÓN [Universitat Politècnica de València].

https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/52272/Molina_Stephenson_TFM_Metodolog%C3%AD_a_Calibraci%C3%B3n.pdf?sequence=1

Morocho, L. (2008). *REDES NEURONALES (RNA)*.

<https://advancedtech.wordpress.com/2008/08/07/redes-neuronales-rna/>

Munavalli, G. R., Kumar, M. S. M., & Kulkarni, M. A. (2009). Wall decay of chlorine in water distribution system. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 58(5), 316–326. <https://doi.org/10.2166/AQUA.2009.048>

Ormsbee, L. E. (2007). The history of water distribution network analysis: The computer age. *8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*, 3.

[https://doi.org/10.1061/40941\(247\)3](https://doi.org/10.1061/40941(247)3)

Ortega, E. (2020). *Propuesta de calibración en redes de distribución mediante software*

computacional para la gestión de recursos hídricos- Pillcomarca 2022 [Universidad César Vallejo]. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/99073/Ortega_BE-SD.pdf?sequence=4&isAllowed=y

Peña-Rojas, A., & Flores-del-Pino, L. (2014). *Redes neuronales para el tratamiento de agua potable en zona de altitud del Perú*.

RAS TITULO B, 1 (2010).

Rodríguez, W., & Benavides, H. (2021). *Modelación hidráulica y calibración de redes de distribución de agua potable*.

<http://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/1984/2335>

Rondan, E. (2016). *Estado del arte de la calibración de modelos hidráulicos. Modelado de fugas con Epanet*. [Universidad de Sevilla].

<https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/47948/Estado%20del%20arte%20de%20la%20calibraci%C3%83%C2%B3n%20de%20modelos%20hidr%C3%83%C2%A1ulicos.%20Modelado%20de%20fugas%20con%20Epanet.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Rossman, L. A. (1994). *EPANET USERS MANUAL*.

https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=124908

Saldarriaga, J., & Jurado, C. (2008). *Metodología de Calibración de Redes de Dsitribución de Agua Potable*. <https://pavcowavin.com.co/metodologia-de-calibracion-de-redes-de-distribucion>

Saldarriaga, J., Lopez, L., Paez, D., Luna, D., & González, S. (2017). *Optimized Design of Water Distribution Networks (Software REDES) Diseño Optimizado de Redes de Distribución de Agua Potable (Programa REDES)*. <https://ssrn.com/abstract=3112868>

Sarmiento, C. (2012). *MÉTODO PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO-ENJAMBRE DE PARTÍCULAS) APLICADO AL PROBLEMA DE MÚLTIPLES OBJETIVOS DEL JOB SHOP SCHEDULING (JSP) O SECUENCIAMIENTO DE MÁQUINAS*.

<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2012/144444.pdf>

Shekofteh, M., Ghazizadeh, M., & Yazdi, J. (2020). A methodology for leak detection in water distribution networks using graph theory and artificial neural network.

<https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1797832>, 17(6), 525–533.

<https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1797832>

SIAPA. (2014). *Lineamientos Técnicos para Factibilidades*.

USAID, Manual de operación y mantenimiento de sistemas de agua potable por gravedad.

Tegucigalpa (Honduras): United States Agency for International Development (USAID),

Manual 23, Servicios Públicos, caja de herramientas 2 (2016).

https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/USAID%202016.%20Manual%20operaci%C3%B3n%20y%20mantenimiento%20de%20agua%20por%20gravedad..pdf

Vega, C. (2007). *CALIBRACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE CON MÉTODOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL*.

Verrastro, C., Gómez, J., & Alcoberro, R. (2009). *Algoritmos Genéticos*.

<https://www.frba.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2021/02/AlgoritmosGeneticos-compressed.pdf>

Walski, T. M., Defrank, N., Voglino, T., Wood, R., & Whitman, B. E. (2006). *DETERMINING THE ACCURACY OF AUTOMATED CALIBRATION OF PIPE NETWORK MODELS*.