



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

OPTIMIZACIÓN DE PRESIONES EN REDES DE AGUA POTABLE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

EDUARDO NICOLÁS NEJAZ MUÑOZ

PROFESOR GUÍA:
YARKO NIÑO CAMPOS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
YOLANDA ALBERTO HERNÁNDEZ
ARIEL FERNÁNDEZ FUENZALIDA

SANTIAGO DE CHILE
2023

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL

Por: Eduardo Nicolás Nejaz Muñoz

Fecha: 2023

Profesor guía: Yarko Niño

La situación actual del cambio climático desafía a buscar soluciones eficientes y estructurales en el ámbito ingenieril. Es de gran importancia que estas soluciones tengan carácter automatizado, permitiendo así la adaptabilidad de la solución a medida que cambien las condiciones del sistema producto del fenómeno. Por otra parte, las aguas no facturadas en Chile ascienden sobre un 30% en los últimos años, haciéndose necesario indagar en metodologías cuyo objetivo sea cuidar el recurso hídrico. En el presente trabajo se propone una metodología que permite optimizar las presiones en la red de distribución de agua. El método propuesto sugiere la localización de válvulas en la red mediante la métrica de influencia resultante de añadir una válvula sobre cada nodo de la red, para luego ajustar la apertura de las válvulas seleccionadas utilizando un algoritmo genético y una red neuronal, con el objetivo de optimizar las presiones en la red, y, por lo tanto, reducir las pérdidas de agua en la misma. El modelo se aplica en dos redes experimentales: la primera red experimental posee 1 fuente, 117 nodos y 134 tuberías. La segunda red posee 2 fuentes, 93 nodos y 133 tuberías. Para ambas redes se emplea el análisis de demanda basado en presiones, y una vez establecida la demanda base, se aplica el algoritmo para calcular las influencias en ambas redes, para posteriormente seleccionar las válvulas teniendo en cuenta la interferencia que puedan tener una sobre otra. Posteriormente, se ajustan las aperturas de las válvulas seleccionadas, simulando el comportamiento de la red de forma horaria para la red neuronal y diaria para el algoritmo genético. Ambos algoritmos fueron adaptados al problema que se desea resolver, y falta analizar su comportamiento en redes reales. La cantidad de válvulas seleccionadas depende de un parámetro límite que se establece de forma experimental, que representa qué tan influyente es la válvula que se desea añadir en comparación con la que está añadida, que debería tener mayor influencia. Para las redes estudiadas, el ahorro de pérdidas observado es de 26 a un 46%, lo cual se mide con el caudal de fuga resultante de aplicar el algoritmo.

Palabras Claves: redes de distribución, agua potable, red neuronal, algoritmo genético, optimización de presión, caudal de fuga.

A mi familia

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, quienes siempre han hecho todo lo posible para darme las oportunidades que tuve durante estos años de carrera. A mi padre, Abel, quien me inspiró desde pequeño a llegar a donde llegué, y que ha sido un ejemplo en muchos aspectos de mi vida. A mi madre, Angélica, quien siempre nos ha puesto por encima de todo, quiero que sepas que valoro todo lo que haces por nosotros. A ambos les agradezco por inspirarme desde pequeño a establecerme metas, a inculcarme la perseverancia y la constancia como valores importantes dentro de mi vida. Esto también es parte del esfuerzo de ustedes, y espero poder retribuir todo lo que me han dado.

A mi hermano menor, Matías, con quien pasamos los momentos más duros juntos, incluyendo una pandemia y enfermedades. Gracias por ayudarme a enfrentar cada momento de estrés con risas, tenis y música.

A mi abuela, María, y a mi abuelo, Santiago, quienes han sido también parte del proceso, y agradezco la oportunidad de poder disfrutar esto también junto a ustedes. Valoro cada palabra de apoyo, cada detalle y consejo que me dieron en estos años.

También, agradecer de forma especial a Ariel, Javier y José, quienes me ayudaron mucho con este trabajo. Gracias por las reuniones, por las explicaciones y por transmitirme lo que han aprendido de sus procesos. Sepan que este trabajo no sería lo mismo sin su ayuda, y que les agradezco cada minuto del tiempo que se dieron para ayudarme en todo lo que necesité, sea de día, de noche o fin de semana.

Finalmente, agradecer al profesor Yarko y a la profesora Yolanda, por su vocación, orientación, buena voluntad y por ayudarme en las distintas etapas de este proceso.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL	i
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivo general	2
1.3. Objetivos específicos	2
1.4. Contenidos del informe	3
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. Redes de distribución de agua	4
2.1.1. Definiciones fundamentales	4
2.1.2. Caracterización red de distribución de agua	4
2.2. Pérdida de agua en la red de distribución	13
2.2.1. Control de presiones como estrategia para disminuir pérdidas en red de agua .	14
2.2.2. Estrategias para controlar la presión	20
2.3. Metodologías existentes para optimizar presiones	21
2.4. Simulación hidráulica de una red de distribución de agua	40
2.4.1. Funcionamiento de PRV	40
2.4.2. Modelo Hidráulico	42
2.4.3. Modelamiento basado en demanda y demanda de presión	43
2.5. Modelación en software WNTR	44
2.5.1. Lenguaje de programación	45
2.5.2. Paquetes informáticos	45
2.5.3. Elementos y caracterización	45
2.6. Red neuronal entrenada mediante aprendizaje por refuerzo	46

2.6.1.	Perceptrones multicapa	47
2.6.2.	Funciones de Activación	49
2.6.3.	Aprendizaje por refuerzo	50
2.6.4.	Procesos de decisión de Markov	51
2.6.5.	Valor Óptimo	52
2.7.	Algoritmo Genético	52
3.	METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA LOCALIZACIÓN DE VÁLVULAS Y OPTIMIZAR LAS PRESIONES EN LA RED DE AGUA POTABLE	54
3.1.	Metodología para determinar las válvulas candidatas en la red y su localización . .	54
3.1.1.	Modelo hidráulico	54
3.1.2.	Desarrollo de métrica representativa de evaluación de desempeño de válvulas en la red de distribución	55
3.1.3.	Conexión de válvulas a la red	57
3.1.4.	Modelación y extracción de resultados representativos	57
3.1.5.	Medida de la influencia y resultado	59
3.1.6.	Selección definitiva de válvulas candidatas	59
3.2.	Metodología para ajustar apertura de las válvulas con Inteligencia Artificial	60
3.2.1.	Red neuronal	61
3.3.	Algoritmo Genético	64
4.	APLICACIÓN SOBRE REDES EXPERIMENTALES	65
4.1.	Red 1	65
4.2.	Red 2	66
4.3.	Demanda y demanda esperada	67
5.	RESULTADOS DE APLICACIÓN	68
5.1.	Red experimental 1	68
5.1.1.	Cálculo de influencias en red experimental y selección de válvulas según solapamiento	68
5.1.2.	Conformación escenario base	69
5.1.3.	Presiones escenario base	71
5.1.4.	Optimización de Presiones	72

5.2. Red experimental 2	77
5.2.1. Cálculo de influencias en red experimental y selección de válvulas según solapamiento	77
5.2.2. Conformación escenario base	77
5.2.3. Presiones escenario base	79
5.2.4. Optimización de Presiones	80
5.3. Control de nivel de estanques	84
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	90
7. CONCLUSIONES	94
BIBLIOGRAFÍA	96
Anexos	100
A. ANEXO A	100
B. ANEXO B	104

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Estrategias para disminuir pérdidas en red de agua	14
2.2	Reducción de pérdidas mediante el control de presiones	17
2.3	Caso de estudio	25
2.4	Características de las tuberías de la red.	26
2.5	Elementos de una PRV.	41
2.6	Red Neuronal	49
2.7	Función de activación ReLU.	50
2.8	Proceso de decisión de Markov. Fuente: Elaboración propia.	51
2.9	Representación valor óptimo. Fuente: Elaboración propia.	52
3.1	Diagrama de funcionamiento de cálculo de influencias y colocación de válvulas. Fuente: Elaboración propia.	58
3.2	Diagrama de funcionamiento del entorno para una red neuronal. Fuente: Elaboración propia.	61
4.1	Red experimental 1.	66
4.2	Red experimental 2.	67
5.1	Influencias red experimental 1.	68
5.2	Selección de válvulas según comparación con válvula de mayor influencia.	70
5.3	Caudal de fuga red experimental 1	71
5.4	Presión en red experimental 1	72
5.5	Presión optimizada en red experimental 1	73
5.6	Convergencia de presión promedio en la red.	74

5.7	Convergencia de recompensa red neuronal.	76
5.8	Presión promedio asociada a apertura de válvulas de forma horaria.	76
5.9	Influencias red experimental 2.	77
5.10	Selección de válvulas según comparación con válvula de mayor influencia.	78
5.11	Caudal de fuga red experimental 2	79
5.12	Presión en red experimental 2	80
5.13	Presión optimizada en red experimental 2	81
5.14	Convergencia de presión promedio en la red.	81
5.15	Convergencia de recompensa red neuronal.	83
5.16	Presión promedio asociada a apertura de válvulas de forma horaria.	84
5.17	Válvulas añadidas de forma manual en la segunda red experimental.	85
5.18	Presión optimizada en red experimental 2	86
5.19	Convergencia de presión promedio en la red.	86
5.20	Convergencia de recompensa red neuronal.	88
5.21	Presión promedio asociada a apertura de válvulas de forma horaria.	89
A.1	Influencia en tubería del reservorio cuando se disminuye presión de control.	103
A.2	Influencia en tubería 15 cuando se disminuye presión de control.	103
B.1	Influencia en tubería 34 cuando se disminuye presión de control.	109
B.2	Influencia en tubería 84 cuando se disminuye presión de control.	110
B.3	Influencia en tubería 52 cuando se disminuye presión de control.	110

ÍNDICE DE TABLAS

2.1	Caracterización de métricas	6
2.2	Métricas Topológicas	6
2.2	Métricas Topológicas	7
2.3	Métricas hidráulicas.	8
2.3	Métricas hidráulicas.	9
2.3	Métricas hidráulicas.	10
2.4	Rango de variación del parámetro NFD según funcionamiento del sistema.	38
2.5	Valores de NFD0 y NFD1.	38
4.1	Parámetros de red experimental 1	65
4.2	Parámetros de red experimental 2	66
5.1	Condiciones de simulación.	72
5.2	Aperturas sugeridas para cada válvula.	73
5.3	Resultados algoritmo genético.	73
5.4	Aperturas sugeridas para cada válvula de forma horaria y caudal de fuga respectivo. .	74
5.4	Aperturas sugeridas para cada válvula de forma horaria y caudal de fuga respectivo. .	75
5.5	Disminución porcentual de pérdidas.	75
5.6	Aperturas sugeridas para cada válvula.	80
5.7	Resultados algoritmo genético.	80
5.8	Aperturas sugeridas para cada válvula de forma horaria y caudal de fuga respectivo. .	82
5.9	Disminución porcentual de pérdidas.	83

5.10	Aperturas sugeridas para cada válvula.	85
5.11	Resultados algoritmo genético.	85
5.12	Aperturas sugeridas para cada válvula de forma horaria y caudal de fuga respectivo. .	87
5.12	Aperturas sugeridas para cada válvula de forma horaria y caudal de fuga respectivo. .	88
5.13	Disminución porcentual de pérdidas.	88
A.1	Influencias acumuladas Red experimental 1.	100
A.1	Influencias acumuladas Red experimental 1.	101
A.1	Influencias acumuladas Red experimental 1.	102
B.1	Influencias acumuladas Red experimental 2.	104
B.1	Influencias acumuladas Red experimental 2.	105
B.1	Influencias acumuladas Red experimental 2.	106
B.1	Influencias acumuladas Red experimental 2.	107
B.1	Influencias acumuladas Red experimental 2.	108
B.1	Influencias acumuladas Red experimental 2.	109

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

Se han desarrollado tecnologías que permiten buscar soluciones cada vez más innovadoras y eficientes para resolver los problemas. Sin embargo, así como se avanza en el desarrollo de estas técnicas, también se presentan problemas de tipo global de urgencia inmediata, como el calentamiento global. La crisis del cambio climático se relaciona directamente con el agua, pues, ante la presencia de este fenómeno, aumenta la variabilidad del ciclo del agua, provocando fenómenos meteorológicos extremos, reduciendo la capacidad de previsión de la disponibilidad de recursos hídricos, lo que implica, entre muchos otros problemas, una limitación de los derechos humanos con respecto al agua potable (ONU, 2019). El aumento de la población, por su parte, provoca un aumento sostenido de la demanda de agua, lo que significa un desafío para las partes involucradas en satisfacer dicha demanda. Es por lo anterior que una mejora de la gestión de los recursos hídricos cobra una gran importancia para llevar a cabo las estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático.

La megasequía es también un problema que desafía fuertemente a la gestión de recurso hídrico a nivel mundial. Chile no es la excepción, ya que desde el año 2010 se ha experimentado un déficit de precipitaciones cercano al 30% entre las regiones comprendidas entre Coquimbo y la Araucanía (A la Nación, 2015). Dado este problema, la cantidad de agua que fluye en los ríos de Chile central se ha visto reducida en respuesta al déficit de precipitaciones. Este efecto también se nota en lagos, embalses, nieve y aguas subterráneas.

Si se analiza el contexto de agua potable en Chile, durante el año 2020 la producción de agua potable fue de 1.796.630 miles de m^3 y el consumo de 1.188.575 miles de m^3 (Instituto Nacional de Estadísticas, 2021). Sin embargo, no toda el agua producida llega a la población, sino que se pierde agua en la infraestructura. En el año 2020, existió un aumento de un 0.5% de agua no facturada, llegando al 33.5% a nivel nacional, es decir, 598.745.000 m^3 (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2020). Esta cifra incluye items como pérdidas por roturas, filtraciones, errores en las mediciones, conexiones clandestinas, fraudes, lavados de redes, extinción de incendios, etc. El

porcentaje de agua no facturada que tiene Chile a nivel internacional es más alto que los reportados, por ejemplo, en Polonia, Inglaterra o Nueva Zelanda.

En el presente trabajo se propone una metodología que trabaja con un modelo hidráulico y demanda basada en presiones, simulando fugas en dos redes experimentales. Se desarrolla una metodología que sugiere la localización y cantidad de válvulas en las redes de distribución y también se desarrolla una metodología que ajusta la apertura de las válvulas seleccionadas utilizando un algoritmo genético y una red neuronal que funciona con aprendizaje por refuerzo, dentro de un entorno continuo. Se espera que el algoritmo sugiera el número y posición de válvulas reguladoras de presión utilizando una métrica denominada influencia, desarrollada específicamente para este fin. Posteriormente a la selección de válvulas, se espera que la inteligencia artificial proponga aperturas para las válvulas seleccionadas en forma de presión de control, para el escenario base que tiene fugas incorporadas.

1.2. Objetivo general

Proponer una metodología para disminuir pérdidas en las redes de agua potable a través de la optimización de presiones, considerando redes de diferentes configuraciones de colocación de válvulas y controles de nivel de estanques, y un modelo hidráulico.

1.3. Objetivos específicos

- Investigar modelos hidráulicos existentes sobre la relación filtración-presión.
- Simular en software de la EPA (WNTR) el comportamiento hidráulico de una red para modelar fugas y/o filtraciones.
- Desarrollo de modelos de inteligencia artificial que sugiera localización óptima de válvulas contribuyentes a la optimización/regulación de presiones en la red.
- Complementar el software WNTR con algoritmos de optimización de presión en distintos puntos de la red.

1.4. Contenidos del informe

El presente trabajo se compone de 7 capítulos:

- (i) **Introducción:** se presenta la motivación para proponer una metodología que opere en redes experimentales de agua potable, la cual viene impulsada por problemas que afectan la disponibilidad de agua al corto y largo plazo, como lo es el cambio climático y la megasequía.
- (ii) **Marco teórico:** se reúnen todos los parámetros y variables necesarias para realizar el estudio, así como también se describen tres modelos distintos de optimización de presiones que se prueban sobre redes distintas, para contar con base teórica sobre la utilización de sistemas de modelamiento hidráulicos y algoritmos de optimización.
- (iii) **Metodología para determinar la localización de válvulas y optimizar las presiones en la red de agua potable:** se describe la metodología utilizada para determinar las válvulas candidatas en la red, que incluye el desarrollo de una métrica representativa para el problema, además del estudio del solapamiento de las válvulas, así como también lo desarrollado para realizar la optimización de presiones utilizando algoritmo genético y red neuronal.
- (iv) **Aplicación sobre redes:** se presentan las redes experimentales sobre las cuales se aplicará el modelo.
- (v) **Resultados de aplicación:** Se presentan los resultados obtenidos para cada red, sobre los cuales se basan las próximas dos secciones. En particular, se presentan resultados de la aplicación del algoritmo tanto en estanques como en localización sugerida por el mismo.
- (vi) **Análisis de resultados y discusión:** se describen los resultados obtenidos y se comparan entre ambas redes.
- (vii) **Conclusiones:** se presentan las conclusiones obtenidas del trabajo, estableciendo las limitaciones, aplicaciones ingenieriles y alcances futuros de la metodología planteada.

2. MARCO TEÓRICO

El presente capítulo tiene por objetivo establecer la base de los conocimientos sobre la cual se sustentará la investigación realizada con respecto a las redes de agua potable, particularmente la optimización de presiones en la red. Se definirán conceptos fundamentales que serán parte del modelamiento.

2.1. Redes de distribución de agua

2.1.1. Definiciones fundamentales

La red de distribución de agua es definida como una infraestructura destinada a proveer agua a través de las ciudades. Su objetivo es entregar a los usuarios una cantidad suficiente de agua a una presión adecuada para una serie de condiciones de demanda en una red a gran escala, mientras que también, generar ingresos para las compañías involucradas y el gobierno (Adedeji et al., 2018).

2.1.2. Caracterización red de distribución de agua

Una red de distribución de agua (WDN, por sus siglas en inglés) se compone de un conjunto de tuberías interconectadas, cada una con un largo, diámetro y coeficiente de resistencia a la fricción definido. En la red también existen nodos, donde se intersectan las tuberías y donde también el agua puede entrar o salir de la red. Los nodos también son conocidos como puntos de demanda o consumo. Cada tubería también puede contar con elementos como válvulas, bombas y conectores. Las bombas se utilizan para entregar suficiente presión al sistema en los nodos. También, el sistema debe contar con una fuente de reserva de agua donde ésta se pueda almacenar. En este punto se conoce la presión (Adedeji et al., 2018).

En el diseño de una WDN, los modelos hidráulicos juegan un rol fundamental en cuanto a la administración y organización de los parámetros del sistema. Con un modelo hidráulico en estado de equilibrio se puede analizar el estado estimado de la red, así como también priorizar potenciales incidentes adversos en la red de tuberías y sus componentes asociados. Aquellos modelos que buscan

evaluar el comportamiento dinámico de un sistema, se denominan modelos hidráulicos dinámicos y usan información en tiempo real de sensores adjuntos en la red para evaluar las condiciones actuales de esta y así enviar automáticamente señales de control a varias componentes de la red. Esto con el objetivo de ajustar el comportamiento en la WDN para hacerla más eficiente.

Dado lo anterior, se hace necesario caracterizar las redes de acuerdo a distintos parámetros, ya que pueden presentar una gran variabilidad de acuerdo a distintos contextos, donde una variable importante que se debe asegurar es la demanda que se tiene que satisfacer. Luego, la caracterización de una red de agua busca brindar información sobre lo que sucede con una red bajo un determinado patrón, donde el diseño, la mantención y la operación del sistema trabajan en conjunto para limitar efectos de desastres y asegurar la demanda que se debe satisfacer. Lo anterior se define como métrica de resiliencia. Las métricas de resiliencia abarcan generalmente cinco categorías: topológica, hidráulica, calidad de agua, seguridad de agua (ante escenarios de contaminación) y económica.

Los principales métodos de caracterización de redes son: estadísticos, espectrales e hidráulicos. El primero contempla la configuración geométrica y topológica de la red para caracterizar un sistema, ya sea como conjunto o por elemento. El segundo método busca el análisis de la matriz de adyacencia, la cual abstrae los elementos de la red, por lo tanto, los factores geométricos no influyen en la observación de forma directa. El tercer y último método mencionado tiene que ver con las características hidráulicas del sistema, como por ejemplo el patrón de demandas, presiones y flujos, por lo que se hace necesario modelar hidráulicamente la red para su obtención (Fernández, 2021).

Las métricas se pueden enmarcar globalmente en sistémicas o elementales, donde:

- **Métricas sistémicas:** índice que representa el funcionamiento de una red para un instante de tiempo (Fernández, 2021).
- **Métricas elementales:** índice que caracteriza cada elemento de la red de forma singular (Fernández, 2021).

En la Tabla 2.1, se presenta una caracterización más detallada de cada métrica.

A continuación, se detalla la caracterización de las redes según métricas topológicas e hidráulicas.

Tabla 2.1. Caracterización de métricas (Fernández, 2021).

Métrica	Característica	Descripción
Sistémica	Estadística	Representan la estructura del sistema, y el valor del índice depende de la conformación topológica de la red
	Espectral	Representan la estructura del sistema, y el valor del índice depende de la matriz de adyacencia, que se asocia al grafo de abstracción de la red. Se calculan a partir de los eigen-vectores y eigenvalores de la matriz
	Hidráulica	Representan el comportamiento hidráulico del sistema, y por lo tanto se deben conocer variables hidráulicas en cada instante de tiempo
Elemental	Estadística	Índice elemental cuyo valor depende de la conformación geométrica y topológica de la red, así como de la posición relativa que ocupa el elemento en la red.
	Hidráulica	Índices que brindan información acerca del comportamiento hidráulico de cada elemento de la red. Considera parámetros como la presión, caudales o pérdidas.

2.1.2.1. Métricas Topológicas

Las métricas topológicas se basan en la teoría de grafos, y se utilizan para evaluar la conectividad de las redes de distribución. Los valores de los distintos indicadores dependen generalmente del diseño de la red y de sus componentes. Así, las métricas topológicas permiten establecer la prioridad que tienen los elementos de una red en términos de centralidad topológica (Fernández, 2021). En la Tabla 2.2, se presentan en detalle algunos tipos de métricas topológicas.

Tabla 2.2. Métricas Topológicas (Fernández, 2021).

Métrica	Descripción
Grado Nodal [-]	Número de tuberías que convergen a un nodo.
Densidad de tuberías [-]	Razón entre el número total de tuberías y el máximo de tuberías en la red. Si se permite que las tuberías conecten un nodo con sí mismo, el máximo número de tuberías sería n^2 , donde n es el número de nodos. En caso contrario, el máximo número de nodos será $n(n - 1)$.

Tabla 2.2. Métricas Topológicas (Fernández, 2021).

Métrica	Descripción
Excentricidad [-]	Máximo número de tuberías entre un nodo y todos los otros nodos en la red. Su valor está entre 0 y el número de tuberías en la red.
Diámetro [-]	Excentricidad máxima en la red.
Centralidad de interposición [-]	Fracción de la longitud de los caminos más cortos que pasan a través de un nodo. Su valor varía entre 0 y 1. Corresponde a la centralidad de un elemento de la red. Se puede determinar según la Ecuación 2.1.
Centralidad de cercanía [$\frac{1}{m}$]	Corresponde al inverso de la suma de la longitud del camino más corto desde un nodo a todos los otros nodos. Se puede determinar mediante la Ecuación 2.2.
Puntos de articulación {0, 1}	Un nodo se considera como punto de articulación si al removerlo, se incrementa el número de componentes conectadas a la red.
Densidad de puntos de articulación [-]	Corresponde a la razón entre los puntos de articulación y el total de nodos en la red.
Puentes {0, 1}	Una tubería se considera puente si su eliminación incrementa el número de componentes conectadas a la red.
Densidad de puentes [-]	Corresponde a la razón entre la cantidad de puentes y el total de tuberías en la red.
Conexión simple	Conexión entre dos nodos, donde no se repiten nodos.

A continuación, se presenta la Ecuación 2.1, que permite calcular la centralidad de interposición:

$$BC_i = \sum_{s,t} n_{st}^i \quad (2.1)$$

donde BC_i es la centralidad de interposición del nodo i ; (s,t) corresponde al par origen-destino de la red y n_{st}^i es la función indicador, igual a 1 si el nodo i es empleado en el camino geodésico st y 0 en caso contrario (Fernández, 2021).

A continuación, se presenta la Ecuación 2.2, que permite calcular la centralidad de cercanía:

$$C_c^*(v_i) = \frac{1}{\sum_j \min d(v_i, v_j)} \quad (2.2)$$

donde $C_c^*(v_i)$ es la centralidad de cercanía del vértice v_i y $\min d(v_i, v_j)$ la distancia mínima necesaria para conectar, a través de tuberías de la red, los nodos v_i y v_j .

2.1.2.2. Métricas Hidráulicas

Se basan en las características del flujo, demanda y/o presión. A excepción de la demanda esperada y la demanda promedio, el cálculo de estas métricas requiere de la modelación hidráulica de la red, la cual representa cómo opera el sistema bajo condiciones normales y anormales (Fernández, 2021). En la Tabla 2.3 se presentan algunas métricas hidráulicas en detalle.

Tabla 2.3. Métricas hidráulicas (Fernández, 2021).

Métricas	Descripción
Presión [mca]	Parámetro utilizado para realizar análisis de satisfacción de estándares de desempeño. También es necesaria para modelar caudales en la red. Si la presión de salida se encuentra cerca de la presión requerida, se evalúa el desempeño de la red, y si la presión de salida se encuentra sobre el mínimo requerido, se evalúa la funcionalidad de la red.

Tabla 2.3. Métricas hidráulicas (Fernández, 2021).

Métricas	Descripción
Demanda [$\frac{m^3}{s}$]	Valor estimado a partir de las características de consumo de los usuarios, así como también de las condiciones hidráulicas de la red de distribución. Depende del estado de la red y determina el caudal obtenido por parte del cliente, siguiendo su comportamiento regular con las condiciones de presión propuestas.
Demanda esperada [$\frac{m^3}{s}$]	Parámetro que se estima a partir de los patrones de demanda del cliente, y que a su vez es independiente del estado de la red.
Disponibilidad del servicio de agua [-]	Razón entre la demanda y la demanda esperada. Es decir, es un indicador que compara el flujo entregado en un escenario determinado con el flujo que se espera entregar en condiciones regulares.
Índice de Todini [-]	Indicador sobre la capacidad de un sistema de lidiar con fallas mientras se entregan los caudales y presiones establecidas. Por lo tanto, es un indicador que caracteriza la resiliencia del sistema para un tiempo específico, basándose en el concepto de la redundancia relativa de energía. Se puede determinar mediante la Ecuación 2.10.

Tabla 2.3. Métricas hidráulicas (Fernández, 2021).

Métricas	Descripción
Entropía [-]	Es una medida de la incertidumbre de una variable. En un modelo de red de distribución de agua, la variable es el flujo en las tuberías, y la entropía puede ser utilizada para medir flujos alternos que puede emplear el flujo para evitar una determinada tubería. Una red que funciona en condiciones de máxima entropía se considera como redundante, pues posee múltiples caminos alternos de flujo para satisfacer la demanda. Se puede determinar la entropía del nodo y la entropía del sistema mediante las Ecuaciones 2.11 y 2.12, respectivamente.
Fracción porcentual de nodos satisfechos en términos de presión [%]	Razón entre nodos que presentan una presión mayor a cierto umbral con la cantidad de nodos que percibirían una presión mayor al mismo umbral en condiciones normales.

El concepto de resiliencia está basado en la noción de que las pérdidas de energía interna incrementarán cuando la demanda incrementa, o cuando ocurran fallos en las tuberías. Por lo tanto, se buscará que exista un superávit suficiente de potencia para ser disipado internamente en caso de que fallen las tuberías o existan incrementos en la demanda. Así, el índice de resiliencia hace referencia a la cantidad de excedente de energía que existe en la red, y matemáticamente se define como un parámetro que está dado por la relación entre el superávit de potencia por unidad de peso que es proporcionado a la red y la máxima potencia por unidad de peso que podría ser disipada internamente por la red sin dejar de satisfacer la presión mínima (Todini, 2000). Luego, a la red de distribución se le suministra una potencia por unidad de peso llamada potencia por unidad de peso de entrada (P_{inp}), cuantificada en términos de los parámetros caudal y presión suministrados por

las fuentes de energía. P_{inp} se calcula mediante la Ecuación 2.3:

$$\sum_{i=1}^{n_e} (Q_e H_e)_i + \sum_{i=1}^{n_{pu}} \frac{P_i}{\gamma} \quad (2.3)$$

donde Q_e es el caudal suministrado por el embalse i , H_e la altura piezométrica suministrada por el embalse i , n_e es el número de embalses, n_{pu} es el número de bombas en la red, P_i es la potencia suministrada por la bomba i . La potencia (P_i) suministrada por una bomba i se puede calcular utilizando la Ecuación 2.4:

$$P_i = \gamma h_i Q_i \quad (2.4)$$

donde P_i es la potencia que suministra la bomba i , h_i es la cota piezométrica y Q_i es el caudal. En cada nodo de consumo de la red se entrega una potencia por unidad de peso, donde se consideran dos tipos:

- (i) Potencia por unidad de peso de salida mínima (P_{out}^{min}): corresponde a la presión mínima en todos los nodos de consumo.
- (ii) Potencia por unidad de peso de salida real (P_{out}^{real}): corresponde a la presión real existente en los nodos.

Para calcular P_{out}^{min} se utiliza la Ecuación 2.5:

$$P_{out}^{min} = \sum_{j=1}^{n_n} Q_j H_{j*} \quad (2.5)$$

donde P_{out}^{min} es la potencia por unidad de peso de salida mínima, Q_j es el caudal suministrado al nodo j y H_{j*} es la altura piezométrica mínima para el nodo j .

Para calcular P_{out}^{real} se utiliza la Ecuación 2.6:

$$P_{out}^{real} = \sum_{j=1}^{n_n} Q_j H_j \quad (2.6)$$

donde P_{out}^{real} es la potencia por unidad de peso de salida real y H_j la altura piezométrica real en el nodo j .

El fluido pierde energía en su paso por la red de distribución, o de forma equivalente, la red consume potencia. Esa potencia se denomina potencia por unidad de peso de operación del sistema (P_{int}), y su valor aumenta con la presencia de fugas en la red de distribución. Dado lo anterior, la potencia por unidad de peso de entrada (P_{inp}) debe ser igual a la suma de la potencia por unidad de peso de operación (P_{int}) y la potencia por unidad de peso de salida (P_{out}). La Ecuación 2.7 muestra cómo se obtiene el valor de P_{int} :

$$P_{int} = P_{inp} - P_{out} \quad (2.7)$$

Al existir dos tipos de potencia por unidad de peso de salida (mínima y real), es posible definir P_{int}^{max} y P_{int}^{real} , que representan potencias por unidad de peso de operación, máxima y real, respectivamente. El valor de P_{int}^{max} se calcula como se muestra en la Ecuación 2.8:

$$P_{int}^{max} = P_{inp} - P_{out}^{min} \quad (2.8)$$

donde P_{int}^{max} representa la máxima potencia por unidad de peso que podría ser consumida internamente por la red sin dejar de satisfacer la presión mínima en todos los nodos de consumo.

El valor de P_{int}^{real} se calcula como se muestra en la Ecuación 2.9:

$$P_{int}^{real} = P_{inp} - P_{out}^{real} \quad (2.9)$$

donde P_{int}^{real} representa la potencia por unidad de peso que realmente consume la red.

Luego, el índice de Todini se calcula como se muestra en la Ecuación 2.10:

$$I = 1 - \frac{P_{int}^{real}}{P_{int}^{max}} \quad (2.10)$$

donde I es el índice de Todini.

A continuación, se presenta la Ecuación 2.10, permite calcular la entropía de un nodo j :

$$S_j = -\sum_{i \in U_j} \frac{q_{ij}}{Q_j} \ln \frac{q_{ij}}{Q_j} \quad (2.11)$$

donde S_j corresponde a la entropía del nodo j , q_{ij} es el flujo de ingreso desde el nodo i hacia el nodo j , Q_j el caudal total que entra al nodo j y U_j el conjunto de nodos inmediatamente aguas arriba del nodo j .

$$\hat{S} = \sum_{j=1}^N \left[\frac{Q_j}{Q_0} S_j \right] - \sum_{j=1}^N \left[\frac{Q_j}{Q_0} \ln \frac{Q_j}{Q_0} \right] \quad (2.12)$$

donde \hat{S} es la entropía del sistema y Q_0 la suma de los flujos de todas las tuberías de la red.

2.2. Pérdida de agua en la red de distribución

El agua tratada en las plantas de tratamiento y distribuida en la red no siempre llega a los usuarios en su totalidad (Adedeji et al., 2018). Una parte importante de la cantidad original se pierde. Esta cantidad usualmente alcanza valores del 30-40% (Araujo et al., 2006). En la actualidad, el problema de pérdidas de agua y su control en los sistemas de distribución alcanza una importancia mayor, pues existe una tendencia a privilegiar la sustentabilidad en el consumo y la protección ambiental.

Al no generar ingresos para las compañías y el gobierno, se le llama agua no generadora de ingresos (NRW, por sus siglas en inglés), y se expresa según la International Water Association (IWA) como se muestra en el siguiente balance (Ecuación 2.13 y 2.14):

$$NRW = W_{perdida} + UAC \quad (2.13)$$

$$W_{perdida} = Real_{perdida} + Aparente_{perdida} \quad (2.14)$$

donde UAC es el consumo no facturado y $W_{perdida}$ el agua perdida.

Uniendo ambas ecuaciones, la mayor componente de las NRW corresponde a pérdidas reales debido a fugas en tuberías, uniones y fittings (Adedeji et al., 2018). Las pérdidas aparentes se deben a inexactitudes de medidas y consumo ilegal.

Aunque en las WDNs las pérdidas son impredecibles y pueden ocurrir fugas en nodos o en las tuberías (en la mayoría de las redes un gran volumen de agua se pierde a través de las tuberías de la red), se han desarrollado estrategias para reducirlas. Estas se presentan en la Figura 2.1 (Adedeji et al., 2018).

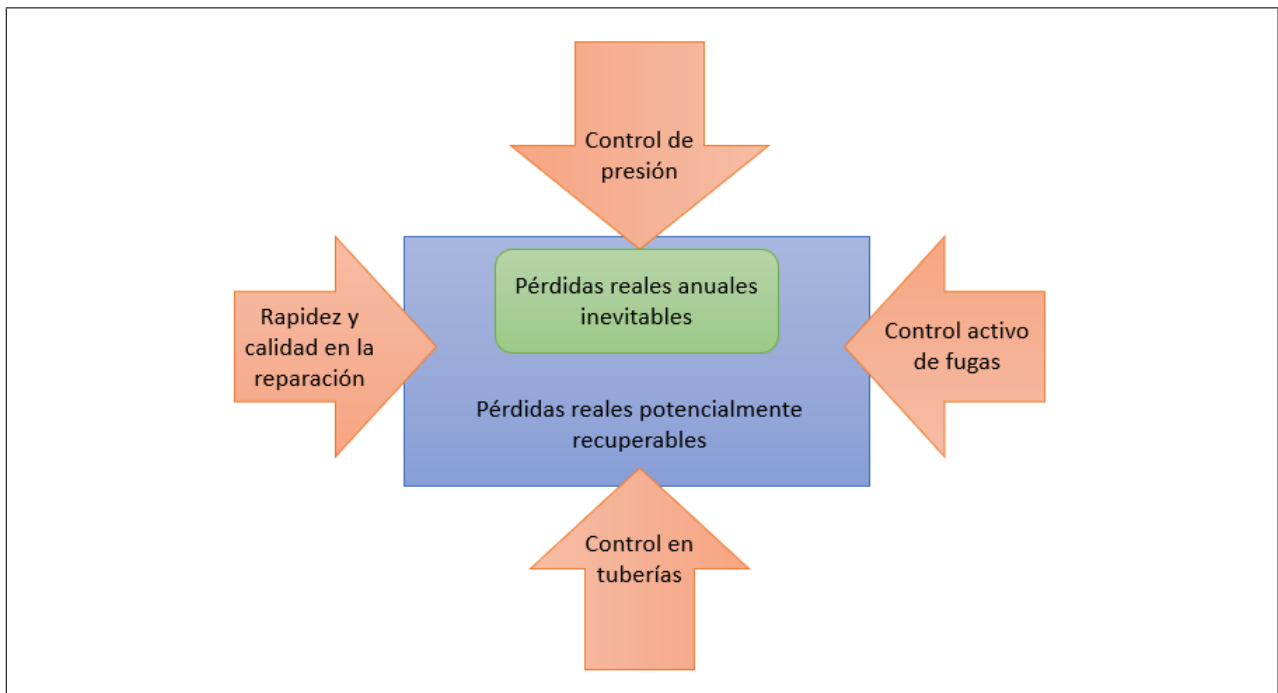


Figura 2.1. Estrategias para disminuir pérdidas en red de agua (Adedeji et al., 2018).

En la Figura 2.1 se aprecia que el control de la presión es uno de los métodos partícipes en la estrategia del control de fugas/disminución de pérdidas.

2.2.1. Control de presiones como estrategia para disminuir pérdidas en red de agua

El escurrimiento en tuberías se puede analizar mediante la Ecuación 2.15:

$$\bar{B}_1 = \bar{B}_2 + \Lambda_f + \Lambda_s \pm \frac{|P|}{\gamma Q} \quad (2.15)$$

donde \bar{B} es el Bernoulli promedio de la sección, Λ_f son las pérdidas friccionales, Λ_s son las pérdidas singulares, P es la potencia de la bomba o turbina, donde se debe sumar el término si se trata de una bomba y restar si se trata de una turbina. Las pérdidas friccionales se pueden calcular con la Ecuación 2.16:

$$\Lambda_f = \frac{f \bar{v}^2}{D 2g} \cdot L \quad (2.16)$$

donde $J = \frac{f \bar{v}^2}{D 2g}$ es la pendiente del plano de carga, L es la distancia entre los puntos de análisis, D el diámetro de la tubería y f el coeficiente de fricción. La altura de carga por pérdidas singulares se calcula utilizando la Ecuación 2.17:

$$\Lambda_s = k_s \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (2.17)$$

donde k_s es el coeficiente de pérdida singular. Luego, para el escurrimiento en tuberías es necesario analizar el valor del coeficiente de fricción f . Para lo anterior, es necesario tener en cuenta el número de Reynolds, el cual se calcula mediante la Ecuación 2.18:

$$Re = \frac{\bar{v} D}{\nu} \quad (2.18)$$

donde D es el diámetro de la tubería, \bar{v} es la velocidad media del flujo y ν la viscosidad. De esta forma, si $Re < 2000$, el flujo de tuberías será laminar, si $Re > 4000$, el régimen es turbulento. Además, se tiene que tener en cuenta que el factor de fricción cambia su forma de cálculo para paredes distintas. A continuación, las Ecuaciones 2.19, 2.20 y 2.21 muestran el cálculo del término $\frac{1}{\sqrt{f}}$:

- Tuberías de pared hidrodinámicamente lisa:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2\log_{10}(Re\sqrt{f}) - 0,8 = 2\log_{10}\left(\frac{Re\sqrt{f}}{2,51}\right) \quad (2.19)$$

- Tuberías de pared hidrodinámicamente rugosa:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2\log_{10}\left(3,7 \cdot \frac{D}{\epsilon}\right) \quad (2.20)$$

- Tuberías de pared hidrodinámicamente en transición lisa-rugosa:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2\log_{10}\left(\frac{\epsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}}\right) \quad (2.21)$$

Entonces, a partir de las características de la pared de la tubería, es posible determinar el factor de fricción, y por lo tanto, la pérdida friccional asociada.

Por otra parte, como se mencionó anteriormente, la regulación de la presión del agua en las tuberías es una herramienta importante a largo plazo para reducir pérdidas en la red. A través del tiempo se han desarrollado diversos métodos para controlar la presión en las WDNs, como por ejemplo el uso de controladores de bomba de velocidad variable, específicamente el Aquavar e-ABII, que consiste en cambiar la velocidad de la bomba a medida que aumenta el uso del agua, para mantener la presión. Este controlador fue desarrollado por Xylem Gould Water Technology, y se utiliza junto a un tanque interruptor de presión.

Usualmente, la regulación de presiones en la red de distribución se logra particionando dicha red en sub-redes más pequeñas, conocidas como distritos hidrométricos (DMAs) o áreas de control de presiones (PMAs). La presión del agua en estas áreas es regulada instalando elementos en la red, como válvulas de control en la entrada de cada zona (Adedeji et al., 2018). Estas válvulas de control incluyen:

- (i) **Válvulas reductoras de presión (PRV):** utilizadas para limitar la presión en la tubería.
- (ii) **Válvulas sostenedoras de presión (PSV):** utilizadas para mantener la presión en un valor específico.

- (iii) **Válvulas controladoras de presión (PCV):** utilizadas para controlar la presión en una zona específica de la red.
- (iv) **Válvulas interruptoras de presión (PBV):** utilizadas para forzar una pérdida específica de presión a través de la válvula.

La presión en la red normalmente se controla instalando válvulas de control, mayormente PRVs al inicio de las PMAs o DMAs, u otras áreas que experimenten un aumento en los caudales de fuga (Adedeji et al., 2018). En la Figura 2.2 se muestra la evidencia obtenida por Vairavamoorthy (1998) de forma experimental, en la que se puede apreciar que, por medio de las válvulas OBJ1 y OBJ2, se reduce el perfil del flujo de filtraciones en la red.

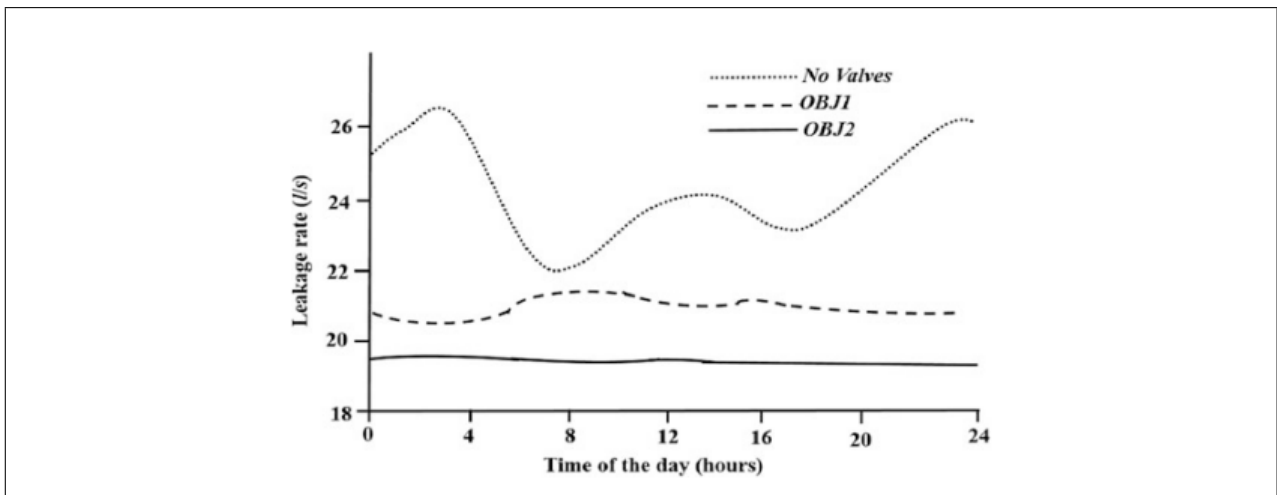


Figura 2.2. Reducción de pérdidas mediante el control de presiones (Vairavamoorthy, 1998).

Así, el control de presiones ya sea mediante la instalación de PRVs en puntos estratégicos de la red o el uso de otros elementos de control de presión pueden reducir significativamente el flujo de filtración en la red. Estas son herramientas efectivas para reducir pérdidas que puedan ser asociadas a cualquier tipo de fuga sin reemplazar infraestructura existente (Thornton & Lambert, 2007).

Representando la fuga como un flujo a través de una tubería abierta, la presión de esta fuga queda definida como se muestra en la Ecuación 2.22 (Adedeji et al., 2018):

$$q_1 = kP^n \quad (2.22)$$

donde q_1 es el flujo de la fuga, k el coeficiente de filtración, P la altura de presión en la tubería y n el exponente de la filtración. El valor de n oscila entre 0.5-2.5. Para entender el valor de n , es necesario tener en cuenta la Ecuación 2.23:

$$Q = C_d A \cdot (2gP)^{0.5} \quad (2.23)$$

donde Q es el caudal de fuga, C_d es el coeficiente de descarga de la filtración, A el área de fuga y P es la presión. Para filtraciones longitudinales en plásticos de polietileno y PVC, se ha detectado que el área de la fuga varía con la presión. Si el área varía linealmente con la presión (por ejemplo una filtración dada en una dimensión), A varía con $P^{1.0}$ y por lo tanto, Q variará con $P^{1.5}$. Si se trata de una filtración en dos dimensiones, es decir, está presente en el eje longitudinal y radial, A varía con $P^{2.0}$ y Q con $P^{2.5}$ (? , ?).

Luego, de la Ecuación 2.22 se deduce que una mayor presión implica un mayor flujo de filtración. Además, este flujo será muy sensible a cambios de presión cuando $n > 1$.

Otra representación es la propuesta por May (1994), la cual se basa en el uso de un área variable de descarga (FAVAD), planteando que las aperturas de las filtraciones varían a lo largo de la tubería. La Ecuación 2.24 modela lo planteado:

$$Q_1 = C_d A_l^f \sqrt{2gH} + C_d A_l^v \sqrt{2gH} \quad (2.24)$$

donde Q_1 es el flujo de la fuga, C_d el coeficiente de descarga de la filtración, A_l^f el área arreglada de la apertura, A_l^v el área variable de la apertura, H la altura de presión en la tubería y g la aceleración de gravedad. El concepto de área arreglada y área variable está basado en el hecho de que las aperturas varían a lo largo de la tubería. Más específicamente, el concepto de área variable y arreglada apunta a una corrección del área inicial de una filtración bajo condiciones de presión igual a cero mediante la suma del potencial de la tubería a aumentar el tamaño de fuga bajo presión.

Luego, el área arreglada se calcula como se muestra en la Ecuación 2.25:

$$A = A_0 + mh \quad (2.25)$$

donde A es el área de fuga a presión h, A_0 es el área inicial de fuga (bajo condiciones de presión cero) y m es la pendiente de presión-área, y representa el potencial de una tubería a aumentar su tamaño de fuga cuando existe presión.

De ambas expresiones, se puede concluir que el flujo de la filtración es sensible a variaciones de la presión. Así, en las WDNs, el control de presiones es una estrategia eficiente para reducir pérdidas. Además, controlando la presión en la red, es posible prevenir un colapso en la tubería y, por lo tanto, extender la vida útil de esta.

En un sistema de distribución de agua, las bombas deben entregar una adecuada presión en los nodos. Como se mencionó anteriormente, una presión elevada en el sistema puede ocasionar un colapso de tuberías, especialmente si son de pequeño diámetro. Así, la probabilidad de que exista una rotura en la red como resultado de las variaciones de presión en el sistema se puede estimar mediante el modelo empírico (Swamee et al., 1999) descrito en la Ecuación 2.26.

$$Pr_k = \frac{0.0021e^{-4.35D_k} + 21.4D_k^8 e^{-3.73D_k}}{1 + 10^5 D_k^8} \quad (2.26)$$

Donde Pr_k es la probabilidad de rotura en la tubería K y D_k el diámetro de la tubería.

En la Ecuación 2.26, es posible ver que la probabilidad de rotura en una tubería es una función decreciente respecto al diámetro de esta, bajo la influencia de variaciones de presión del agua. La tasa a la que ocurren nuevas filtraciones está influenciada, en gran parte, por las altas presiones (Lambert, 2001).

2.2.2. Estrategias para controlar la presión

A continuación, se detallarán técnicas como: (i) Regulador externo para control de presión, (ii) Control de presión por tiempo modulado, (iii) Control de presión por flujo modulado, (iv) Control de presión por ciclo cerrado, (v) Controlador del parámetro-menos-P y (vi) Optimización.

- (i) **Regulador externo para control de presión (FOPC)**: usualmente se utiliza un elemento en la red, como una válvula reductora de presión (PRV). Esta puede provocar una pérdida de presión debido a la fricción del flujo del agua con la pared de la tubería. La PRV es usada para controlar la presión máxima en una zona de la red. Esta zona es, usualmente, aquella que presenta la mayor presión en la misma. Esta estrategia no requiere la instalación de algún otro elemento en la red, por lo que el costo de utilizarla es conveniente. Una desventaja de la estrategia es que no puede ajustar la presión del agua de acuerdo a la variación de la demanda en distintas horas del día.
- (ii) **Control de presión por tiempo modulado (TMPC)**: esta estrategia funciona igual que la estrategia FOPC, pero añadiendo un dispositivo con un controlador en la red, llamado controlador de tiempo modulado. Este elemento ocasiona una disminución de presión durante los períodos de menor actividad en la red. Esto hace que el método TMPC ofrezca una mayor flexibilidad ante ajustes de presión en diferentes horas del día, la cual se logra con el controlador. La estrategia se usa mayormente en las noches, cuando los usuarios se encuentran durmiendo. La limitación del método son los incendios, pues son ocasiones que demandan la totalidad de la presión para combatir el fuego, y este método muchas veces no es capaz de suplir esta presión. Además, se requiere cierta expertiz para operar y mantener los elementos añadidos en la red, en comparación con la estrategia FOPC.
- (iii) **Control de presión por flujo modulado (FMPC)**: esta estrategia utiliza un controlador electrónico en conjunto con una PRV instalados al ingreso de las zonas que presentan una mayor presión de la red. El método provee más flexibilidad y control que el método TMPC, aunque no es más económico. El costo del controlador electrónico utilizado es

alto ya que requiere un medidor de tamaño adecuado a las PRVs. Una ventaja del método es su capacidad de responder automáticamente a la demanda en caso de incendio.

- (iv) **Control de presión por ciclo cerrado (CLPC):** esta técnica ajusta parámetros de las PRV basándose en la presión en puntos críticos de las PMA. Este ajuste se realiza mediante la instalación de sensores de presión, localizados en puntos críticos de la red. Esto logra proveer información en tiempo real al controlador de presión ubicado al ingreso de las PMAs. Si bien se trata de una herramienta más compleja y de mayor costo, esta estrategia maximiza los beneficios de controlar la presión en la red, pues provee un nivel máximo de control. La desventaja del método es que existe más probabilidad de que fallen algunos equipos, ya que funciona mediante el análisis de los puntos críticos de la red.
- (v) **Optimización:** método utilizado para controlar parámetros operacionales de las PRVs o PCVs. Se trata de una herramienta utilizada para lograr un ajuste de apertura y parámetros de PCVs o PRVs óptimos. La localización óptima, así como también el ajuste de apertura de las válvulas son fundamentales para la regulación efectiva de presiones. Este ha sido un método bastante estudiado a través de los años, siendo Jowitt (1990), y Hindi (1991) los pioneros de brindar la primera mirada al problema. En estas investigaciones, se introdujo una localización óptima de válvulas de control en redes de distribución de agua utilizando el método de optimización. También, se desarrolló un modelo para decidir la localización y apertura óptimos en válvulas de control en una WDN (Araujo et al., 2006). Dicho modelo utiliza un método de optimización genético para lograr controlar la presión. Por último, Nazif (2010) desarrolló un modelo para reducir la presión en las WDNs urbanas, utilizando un método de optimización de algoritmo genético y redes neuronales artificiales. Los resultados del modelo mostraron que las filtraciones y pérdidas pueden reducirse alrededor de un 30% regulando las presiones en las redes.

2.3. Metodologías existentes para optimizar presiones

Se han propuesto diversas metodologías para minimizar la presión como parámetro condicional del indicador de filtración en los sistemas de distribución de agua. Ejemplos de ello son Jowitt

(1990), Vítkovský (2000), Alonso (2000) y Ulanicka (2001). En esta misma línea, Jowitt (1990), Reis (1999), Ulanicka (2001) y Vairavamoorthy (1998) propusieron que la mejor solución debe incluir la utilización de elementos que provoquen una pérdida de presión, como una PRV.

A continuación, se describirán modelos que servirán de base para proponer una nueva metodología. El primero que se describirá es el de Araujo et al. (2006), cuyo propósito es obtener una solución que permite, simultáneamente, optimizar el número de válvulas y su localización, así como también refinar el ajuste de apertura de cada válvula. Se desarrolló una metodología basada en dos fases: (1) Evaluación de una función objetivo, destinada a optimizar el número y localización de válvulas, y (2) Función objetivo para el ajuste de apertura de válvulas.

(i) Metodología (Araujo et al., 2006):

- **Sistema de modelamiento hidráulico:** utiliza EPANET, sistema ampliamente conocido y de fácil acceso, pues es gratuito. Existe una gran comunidad de usuarios de este programa alrededor del mundo.
- **Algoritmo de Optimización:** emplea el Algoritmo Genético, el cual es parte de técnicas metaheurísticas y no determinísticas de búsqueda y optimización, que manipula un espacio de posibles soluciones utilizando el mecanismo adaptativo de Selección Natural de Darwin (Rate & Cue, 1992). La técnica es robusta y eficiente en espacios de búsqueda complejos, multidimensionales e irregulares. Opera en una población de puntos, trabaja de forma representativa los parámetros (normalmente representación binaria), usa reglas no determinísticas y, para cada elemento del grupo, requiere información sólo en el valor de la función objetivo. Particularmente, se utiliza el Algoritmo Genético convencional-generacional, donde la población es reemplazada por nuevos elementos generados por el proceso de selección y aplicación de los operadores “mutación” y “entrecruzamiento”. Así, el operador reemplaza completamente padres por hijos, teniendo la posibilidad de perder

buenos elementos. Esta desventaja se supera con la aplicación de “elitismo”, que permite preservar el mejor elemento de la generación pasando directamente una copia a la siguiente generación.

- **Función objetivo:** depende del caso de estudio y está ligada al sistema de modelamiento hidráulico. Como se mencionó anteriormente, es posible distinguir dos fases:

- (a) **Primera Fase:** consiste en optimizar el número y localización de las válvulas de control en el sistema de distribución de agua. Se consideran válvulas ficticias en cada tubería simulando una rugosidad adicional que minimiza las presiones en cada nodo del sistema de tuberías. Los escenarios para la localización de cada pseudo válvula son generados al azar, según se alcance la mínima presión requerida por sistema, con una cantidad y localización óptima de válvulas. La función objetivo de la primera fase se presenta en la Ecuación 2.27:

$$f(p_i, nv) \Big|_{t=1}^T = \frac{nv_t}{\left\{ \sum_{i=1}^N [(P_{cal,i,t} - P_{min})/P_{min}]^2 \cdot nv_t + nv_t \right\} \Big|_{t=1}^T} \quad (2.27)$$

donde T es el total de intervalos a simular (generalmente 24 de una horas); N la cantidad de nodos; $P_{cal,i,t}$ la presión calculada en el nodo i para la hora t ; P_{min} la presión mínima, preestablecida por el usuario para cada nodo de la red y nv_t el número de válvulas calculadas para cada t , siendo una condicionante del problema, pues se desea obtener el menor número posible de válvulas.

- (b) **Segunda Fase:** el objetivo es establecer el ajuste de apertura para distintos tipos de válvulas a través del coeficiente de pérdida de carga (K_v) para las válvulas controladoras de aceleración (TVC) o la presión aguas abajo de las válvulas reguladoras de presión (PRV). Se informa el número más adecuado y la localización de las válvulas que serán necesarias, las cuales son económicas,

técnicamente viables y simples para optimizar el ajuste de apertura. La función objetivo de la segunda fase se presenta en la Ecuación 2.28:

$$f(p_i)|_{t=1}^T = \frac{1}{\sum_{i=1}^N [(P_{cal,i,t} - P_{min})/P_{min}]^2|_{t=1}^T} \quad (2.28)$$

donde los parámetros T ; N ; $P_{cal,i,t}$ y P_{min} son los mismos de la primera fase.

- **Modelamiento hidráulico:** la técnica para una describir la demanda de forma más consistente es ingresar parte del flujo medido a la componente de filtración, y así considerar la demanda como dependiente de la presión. Las ecuaciones utilizadas para el cálculo de la fuga y el coeficiente de filtración corregido para cada nodo se muestran en las Ecuaciones 2.29 y 2.30:

$$q_j = K_f p_j^\beta \quad (2.29)$$

$$K_f = c \cdot \sum_{J=1}^M 0.5 \cdot L_{ij} \quad (2.30)$$

donde q_j es el flujo de la filtración en el nodo j ; β es el exponente de la presión, cuyo valor se encuentra en la literatura; p_j la presión de servicio en el nodo j ; K_f es el coeficiente de filtración corregido para el nodo, estimado como función de la tubería y características del suelo; c es el coeficiente de descarga del orificio, el cual depende de la forma y el diámetro; L_{ij} es el largo de la tubería entre los nodos i y j y M es el número de tuberías conectadas al nodo j .

Los valores del coeficiente K_f se distribuyen entre nodos, para considerar las pérdidas en resolución del balance hidráulico de la red. Para la distribución de estos coeficientes (exponente β y factor K_f), así como también los valores del factor de consumo F_c , se adopta la metodología desarrollada por (Araujo et al., 2003).

- **Caso de estudio y resultados:** La red en la que se aplicó el modelo es aquella que está referenciada en Jowitt (1990), y que se presenta en la Figura 2.3.

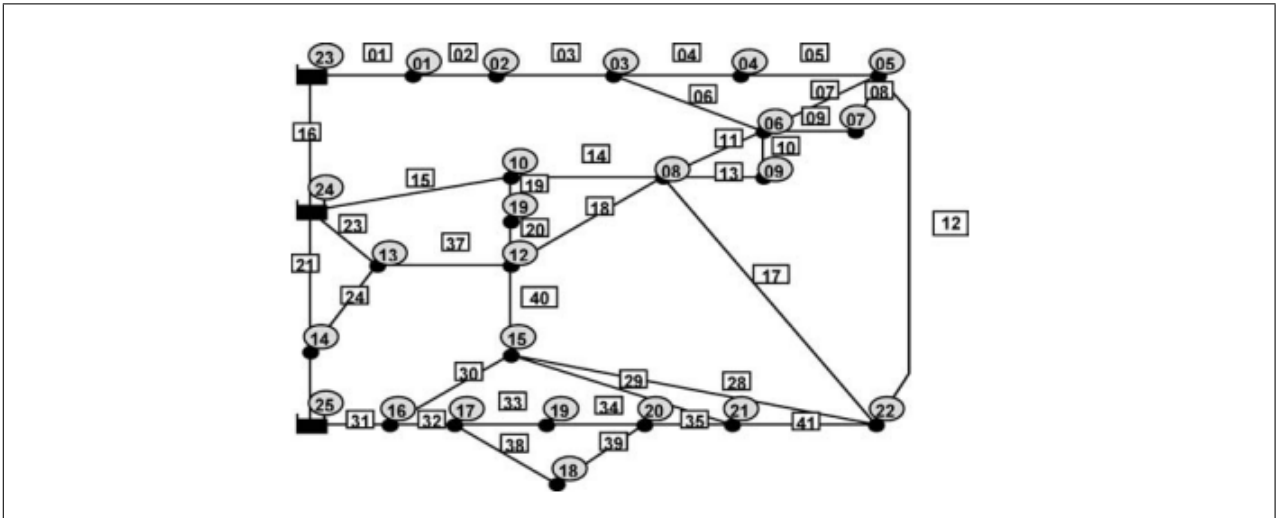


Figura 2.3. Caso de estudio. Fuente: (Araujo et al., 2003).

La Figura 2.4 muestra las características de las tuberías de la red de estudio.

ID_Pipe	Length (m)	Diameter (mm)	Roughness ($m^{1/3}s^{-1}$)	ID_Node	Elev. (m)	Base cons. (ls^{-1})	Emitter (K_f) ($ls^{-1}m^{-1/2}$)
P_01	606	457	110	N_01	18.0	5.0	0.012055
P_02	1930	457	110	N_02	18.0	10.0	0.033656
P_03	5150	305	10	N_03	14.0	0.0	0.032088
P_04	326	152	100	N_04	12.0	5.0	0.005562
P_05	844	229	110	N_05	14.0	30.0	0.018383
P_06	1274	152	100	N_06	15.0	10.0	0.019238
P_07	1115	229	90	N_07	14.5	0.0	0.005300
P_08	500	381	110	N_08	14.0	20.0	0.018853
P_09	615	381	110	N_09	14.0	0.0	0.003532
P_10	300	299	90	N_10	15.0	5.0	0.019837
P_11	743	381	110	N_11	12.0	10.0	0.006270
P_12	1408	152	100	N_12	15.0	0.0	0.024410
P_13	443	229	90	N_13	23.0	0.0	0.016842
P_14	249	305	105	N_14	20.0	5.0	0.019490
P_15	3382	305	100	N_15	8.0	20.0	0.028884
P_16	454	457	110	N_16	10.0	0.0	0.013467
P_17	931	229	125	N_17	7.0	0.0	0.010957
P_18	1600	457	110	N_18	8.0	5.0	0.005286
P_19	542	229	90	N_19	10.0	5.0	0.009203
P_20	777	229	90	N_20	7.0	0.0	0.010819
P_21	2782	229	105	N_21	10.0	0.0	0.020118
P_24	1014	381	135	N_22	15.0	20.0	0.034997
P_28	2334	229	100				
P_29	832	152	90				
P_30	914	229	125				
P_31	1097	381	6				
P_32	822	305	140				
P_33	1072	229	135				
P_34	864	152	90				
P_35	711	152	90				
P_37	762	457	110				
P_38	411	152	100				
P_39	701	229	110				
P_40	1996	229	95				
P_41	2689	152	100				
P_23	1767	475	110				
P_36	304	381	135				

Figura 2.4. Características de las tuberías de la red. Fuente: (Araujo et al., 2003).

En esta red, con la aplicación de la metodología se obtiene una disminución del caudal de fuga de 27.3 l/s a 22.1 l/s (20.1% aproximadamente de ahorro con respecto al caudal de fuga original), aparte de un análisis de la posición de válvulas.

(ii) Metodología Nazif (2010):

- **Sistema de modelamiento hidráulico:** Utiliza EPANET y el modelo de Red Neural Artificial (ANN) para simular la presión y las pérdidas. EPANET se utiliza para simular el comportamiento de las redes de agua. El programa tiene muchas ventajas si

se compara con herramientas alternativas, y es conocido por su utilidad en el análisis hidráulico de las redes. Una ventaja es que posee una opción de emisores que se pueden ubicar en cada nodo, y que son instrumentos conectados a los nodos que controlan el flujo de inyección desde la boquilla. Luego, este modelo hidráulico se complementa con el algoritmo de optimización. La ventaja de ANN es que puede representar funciones complejas, no lineales, sin la necesidad de predeterminedar la forma del modelo (por ejemplo lineal, polinomio, etc.) (Leshno et al., 1993). También, ANN ha sido utilizado para varias aplicaciones, incluyendo la calibración de los sistemas de distribución de agua (Lingireddy & Ormsbee, 1998), modelamiento de reactores químicos (Kalagnanam & Diwekar, 1997), modelamiento de sistemas complejos de aguas subterráneas, etc.

- **Algoritmo de Optimización:** emplea el Algoritmo Genético para alcanzar, de forma horaria, niveles de agua óptimos en los tanques de almacenamiento en diferentes temporadas, con el objetivo de minimizar el nivel de pérdidas. Para lograr lo anterior, se consideran índices de resiliencia y falla del sistema como restricciones en el modelo de optimización. Así, primeramente se utilizan los resultados de la simulación del modelo de sistema de distribución para adaptar un modelo de Red Neural Artificial (ANN). El resultado (función de presión hidráulica) será introducido al Algoritmo Genético de optimización (GA) para simular las presiones hidráulicas y las pérdidas en cada nodo del sistema de distribución de agua, basándose en el nivel de agua en los tanques de almacenamiento, el consumo de agua y la elevación de cada nodo.

Un problema es que la pérdida y su interacción con la presión en la red no ha sido considerada en las aplicaciones disponibles del GA de sistemas de distribución y requiere complementar el GA con un modelo hidráulico. El valor exacto de la pérdida en la red se desconoce y, por lo tanto, modelar la demanda en los nodos sin considerar esta pérdida conlleva algunos errores al estimar las presiones en estos nodos. Para resolver el problema y poder, por lo tanto, modelar la pérdida, se requiere un

mayor esfuerzo por simular la situación, es decir, realizar simplificaciones y asunciones lógicas.

En el presente modelo, los valores genéticos son la elevación diaria de agua considerando las variaciones en la demanda. El número de genes en un cromosoma para una planificación por temporada de un sistema de distribución de agua con N estanques de almacenamiento es 24 horas x 4 temporadas x N. Esto equivale a 96 genes para una red de distribución con un solo estanque de almacenamiento.

- **Función objetivo:** Las pérdidas se dan en todos los elementos de la red (tuberías, bombas, válvulas, etc), sin embargo, las de las tuberías son más importantes ya que suelen ser muchas tuberías en la red. Además, se sabe que las pérdidas se relacionan con las presiones. Así, para minimizar las pérdidas, se deben optimizar las presiones en la red. Así, el modelo propone minimizar las pérdidas del sistema de distribución de agua a través de un esquema que logre administrar de mejor forma las presiones. La función objetivo (Ecuación 2.31) y sus restricciones (Ecuaciones 2.32 a 2.42) se presentan a continuación:

$$\min(Z) = M \sum_{i=1}^{ns} \sum_{j=1}^{nh} \sum_{k=1}^{nn} C_k [f(H_k, q_{ijk}^*, HR_{1ij}, HR_{2ij}, \dots, HR_{Tij})]^{n_k} \quad (2.31)$$

sujeto a:

$$P_{ijk} = f(H_k, q_{ijk}^*, HR_{1ij}, HR_{2ij}, \dots, HR_{Tij}), \quad \forall_i, \forall_j, \forall_k \quad (2.32)$$

$$\sum_{m=1}^T S_{mij+1} = \sum_{m=1}^T S_{mij} + \sum_{n=1}^N SP_{nij} - Q_{ij} \quad \forall_i, \forall_j \quad (2.33)$$

$$IT_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{nn} q_{ijk}^* (P_{ijk} - P_{min})}{\sum_{m=1}^T QR_{mij} HR_{mij} + \sum_{n=1}^N (POW_{nij} / \gamma) - \sum_{k=1}^{nn} q_{ijk}^* P_{min}} \quad \forall_i, \forall_j \quad (2.34)$$

$$If_{ijk} = \begin{cases} 0 & \forall k : P_{ijk} \geq P_{min} \\ q_{ijk}^*(P_{min} - P_{ijk}) & \forall k : P_{ijk} < P_{min} \end{cases} \quad \forall i, \forall j, \forall k \quad (2.35)$$

$$If_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{nn} If_{ijk}}{\sum_{k=1}^{nn} q_{ijk}^* P_{min}} \quad \forall i, \forall j \quad (2.36)$$

$$P_{min} < P_{ijk} < P_{max} < P_{m_{max}} \quad \forall i, \forall j, \forall k \quad (2.37)$$

$$HR_{m_{min}} < HR_{mij} < HR_{m_{max}} \quad \forall i, \forall j, \forall m \quad (2.38)$$

$$SP_{nij} < SP_{n_{max}} \quad \forall i, \forall j, \forall n \quad (2.39)$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^{nh} SP_{nij} < SP_{day} \quad \forall i \quad (2.40)$$

$$Ir_{ij} > Ir_{min} \quad \forall i, \forall j \quad (2.41)$$

$$If_{ij} < If_{max} \quad \forall i, \forall j \quad (2.42)$$

donde M es un coeficiente de sanción, igual a 10^4 , que se aplica cuando no se cumplen las restricciones (si se cumplen éste es igual a 1); C_k es el coeficiente de la relación pérdida–presión corregido del nodo k ; H_k la elevación del nodo k [m]; q_{ijk}^* la demanda de agua del nodo k en la hora j en la temporada i [l/s]; HR_{mij} la altura de agua del tanque m en la hora j en la temporada i [m]; n_k la influencia de la presión en la relación pérdida–presión, valor que varía entre 0.5–1.5 (Lambert, 1997) y que para el modelo de Nazif (2010) se considera constante igual a 1.8; P_{ijk} la presión del nodo k en la hora j en la temporada i [m]; S_{mij} el volumen de agua

en el estanque m en la hora j en la temporada i [m^3]; Q_{ij} la demanda de agua en la hora j de la temporada i [m^3/h]; SP_{nij} la descarga de agua en la bomba n en la hora j en la temporada i [m^3]; Ir_{ij} el índice de resiliencia de la red de distribución en la hora j de la temporada i ; QR_{mij} la descarga desde el tanque m a la hora j en la temporada i [l/s]; POW_{nij} la potencia de la bomba n en la hora j en la temporada [W]; If_{ijk} el índice de falla del nodo k en la hora j en la temporada i ; If_{ij} el índice de falla hidráulica del sistema en la hora j en la temporada i ; P_{min} la presión mínima que necesita cada nodo [m]; P_{max} la presión máxima sugerida en cada nodo [m]; $P_{m_{max}}$ la presión máxima permitida en cada nodo [m]; $HR_{m_{min}}$ nivel mínimo de agua en el estanque [m]; $HR_{m_{max}}$ nivel máximo de agua en el estanque [m]; $SP_{n_{max}}$ la capacidad máxima horaria de la bomba n [m^3]; SP_{day} la volumen máximo requerido diariamente para el bombeo [m^3]; Ir_{min} el índice de resiliencia mínimo para la red de distribución de agua; If_{max} el máximo índice de falla permitido para la red de distribución de agua; ns el número de temporadas considerado; nh el número de horas consideradas en el período considerado; nn el número de nodos en la red de distribución de agua; T el número de estanques de almacenamiento en el sistema de distribución de agua; N el número de bombas en la red de distribución; k índice de nodos que varía entre 1 a nn ; j el índice de horas que varía entre 1 y nh ; i el número de temporadas consideradas que varía entre 1 y ns ; m el índice de estanques de almacenamiento y n el índice de bombas.

La Ecuación 2.32 se utiliza para calcular la presión en los nodos como función del nivel de agua en cada estanque de almacenamiento y la demanda y elevación del nodo, que se obtienen del modelo hidráulico. El algoritmo tiene como límites superior e inferior la elevación de agua en cada estanque de almacenamiento, la presión en los nodos, la capacidad de bombeo horaria y diaria, la resiliencia y los índices de falla.

La continuidad horaria para el volumen de agua en el estanque de almacenamiento

en cada temporada está dada por la Ecuación 2.33. Las Ecuaciones 2.34 y 2.36 representan la resiliencia y los índices de falla del sistema, respectivamente.

La resiliencia es la capacidad de tratar con emergencias o fallas en el sistema. Ante un evento sin precedente que cause caída de presión repentina, debería existir más energía de la requerida en cada nodo. Lo anterior se expresa en la Ecuación 2.43:

$$\bar{B}_1 = \bar{B}_2 + \Lambda_f + \Lambda_s + E \quad (2.43)$$

donde \bar{B} es el Bernoulli promedio de la sección, Λ_f son las pérdidas friccionales, Λ_s son las pérdidas singulares y E es la energía adicional que debería existir en el nodo 2 según el concepto de resiliencia, ante un evento sin precedente.

De esta forma, si el sistema falla, esta energía adicional es utilizada para compensar cualquier pérdida adicional. Si incrementa el índice de resiliencia de la red, quiere decir que la habilidad de la red para enfrentar una emergencia es mayor.

Por otra parte, el índice de falla muestra la intensidad de la falla en el sistema. El concepto de índice de falla en el sistema de distribución hace referencia a la desviación de la presión mínima deseada para el sistema. Ante una deficiencia de la presión, no se alcanza la demanda total y el sistema no mantiene el nivel mínimo. Para determinar el índice de falla de la red completa, primero se debe calcular la intensidad de la falla en cada nodo utilizando la Ecuación 2.35 y luego el índice de falla para el sistema completo con la Ecuación 2.36.

- **Modelamiento hidráulico:** la pérdida y la presión están altamente relacionadas y para estimar correctamente la pérdida, la red debería ser analizada por el método *Head Driven Simulation* (HDSM), el cual incorpora de forma directa la relación entre el caudal de salida en los nodos y la presión. Sin embargo, se propone modelar la pérdida en la red utilizando EPANET (Nazif, 2010). El flujo desde un emisor es función de la presión en un nodo determinado, y se calcula mediante la Ecuación 2.44.

$$Q_k = C_k P_k^{n_k} \quad (2.44)$$

donde Q_k es el flujo, P_k la presión, C_k la intensidad del flujo y n_k término de potencia en el nodo k . La Ecuación 2.44 se puede utilizar para modelar la pérdida. Con tal propósito, se deben evaluar los parámetros C_k y n_k . El valor de C_k se calcula utilizando la Ecuación 2.45, mientras que el valor de n_k es constante y es igual a 1.18 (Germanopoulos, 1985).

$$C_k = C \sum_{j=1}^m \frac{L_{kj}}{2} \quad (2.45)$$

Donde L_{kj} es el largo de la tubería j unida al nodo k , m es el número de tuberías conectadas al nodo k y C es un coeficiente de corrección calculado para la red completa, como sigue en la Ecuación 2.46 (Tabesh et al., 2009)

$$C = \frac{Pérd}{\sum_{k=1}^{nn} (\sum_{j=1}^m \frac{L_{kj}}{2} \cdot P_k^{n_k})} \quad (2.46)$$

donde $Pérd$ es el valor de la pérdida en el tiempo de flujo mínimo nocturno. En la parte baja de la ecuación, la presión es evaluada en el mismo tiempo que el valor $Pérd$.

Es importante considerar el efecto promedio de la presión en la tubería para calcular la pérdida en esta. En una situación normal, la presión promedio de la tubería es igual al promedio de los valores de presión en ambas terminaciones. Para el método de Nazif, se considera que cada mitad del largo de la tubería tiene la misma presión de su nodo de terminación considerando el flujo, y esta se incorpora a la ecuación de la pérdida a través del cálculo de C . Utilizando este método, el valor de la pérdida de la primera mitad está sobreestimado, y el valor de la pérdida de la segunda mitad está subestimado. Luego de calcular C para la red completa, el valor de C_k para cada nodo puede ser determinado por la Ecuación 2.45 y es considerado como el coeficiente de flujo de los emisores en la modelación hidráulica.

Para calcular el factor C , es importante tener una buena primera estimación para una convergencia más rápida. Esta primera estimación se obtiene utilizando la presión

del primer nodo sin considerar la pérdida. Luego de esta estimación, se calcula la pérdida y se actualiza según el método de Newton (Gerald & Wheatley, 2009). Para lo último se considera la ecuación:

$$C_{new} = C_{old} - \frac{f(C_{old})}{f'(C_{old})} \quad (2.47)$$

donde C_{old} y C_{new} son la estimación previa y nueva de C , respectivamente y f es una función de la diferencia entre las pérdidas asumidas y calculadas. El método de Newton debe continuar hasta que el valor de la pérdida calculado sea aproximadamente igual al valor de la pérdida observado en terreno.

- **Modelamiento ANN:** para simular la variación de presión, se debe utilizar un modelo de simulación con el modelo de reducción de pérdidas propuesto anteriormente. Los resultados de EPANET son utilizados en el modelo ANN. Estos valores corresponden a rangos de variación de la capacidad de almacenamiento, demandas efectivas de agua, etc.
- **Caso de estudio y resultados:** en esta metodología se estudia el caso de Teherán, megaciudad capital de Irán, donde a pesar de la gran inversión de capital, la red de distribución necesita un suplemento robusto de agua y administración de demandas. Las pérdidas alcanzan el 26% de toda el agua suministrada. Del porcentaje anterior, del 50 al 60% se debe a fugas. La aplicación de la metodología resulta en el ahorro de las pérdidas anuales de más del 30% de la fuga promedio.

(iii) Metodología Özdemir, Firat, Yılmaz, and Usluer (2021):

- **Sistema de modelamiento hidráulico:** Se utiliza EPANET para crear y simular el modelo hidráulico del sistema, y se aplica un algoritmo genético (GA) para el control de la presión. Con este fin, se realizó la optimización del monto de apertura, número y posición de válvulas de control para optimizar los valores de las pérdidas. Se analizaron varios escenarios con diferentes números y posiciones de válvulas de control, donde se determinó el más ideal. Marunga (2006) dirigió la aplicación del control de presión (PM) en áreas piloto (Mutare city, Zimbabwe), donde la presión

de operación es alta. Se determinó que la presión de operación en las regiones piloto seleccionadas está entre los 75 y 80 [mca], y el rango de las aguas no generadoras de ingresos (NRW), a esta presión, es de 47 a 32%. Como resultado del trabajo realizado en campo, si la presión de salida es de 50 [mca] se logra un ahorro del 25% del MNF. Con el propósito de analizar el efecto del PM en la reducción de valores de las pérdidas, se instalan válvulas reductoras en una zona piloto aislada, *data loggers* y un medidor de flujo. El primer registro se realiza sin la utilización de la válvula reductora de presión, el segundo registro incorpora la fijación de un valor determinado de la presión de salida para la PRV y en el tercer registro, la presión de la PRV se ajusta dos veces. Con la utilización de la PRV, el suministro de agua a la red decreció un 18% como resultado de la disminución de la presión en la zona de trabajo a un 30%. Como el control de presión es sensitivo al flujo, ésta decreció a un 21%.

Así, se analiza y evalúa el efecto de la presión en las pérdidas de agua, el balance de agua en la red y el rango de MNF de acuerdo con datos y pruebas en campo. Con este propósito, se determina el MNF y el valor potencial de la pérdida, el cual es medido por condiciones operacionales de la red (presión actual y propiedades físicas de la red), antes de aplicar el control de presión en la región piloto aislada. Luego, considerando las características de la región, se reduce la presión con la ayuda de un sistema de control de presión y se monitorean los MNFs cuando esto se realiza (nuevas condiciones). El nivel teórico de pérdidas se analiza de acuerdo con la ecuación FAVAD (por sus siglas en inglés: *Fixed and Variable Area Discharges*), donde se explicita que el área transversal en los distintos tipos de roturas o rajaduras, ya sean tuberías o accesorios, varían con la presión ejercida en ellas. La evaluación se realiza comparando esto con los resultados reales obtenidos en campo. Esta comparación es particularmente importante, pues se implementa el PM en campo, técnicamente determinando el nivel al cual la pérdida puede disminuir.

- **Relación presión-filtración:** Las características de la red, factores ambientales, y las condiciones de operación del sistema son muy efectivas para ocasionar nuevas

fallas o quiebres en el sistema de distribución. Una causante de nuevas fallas es el repentino cambio en la presión y las fluctuaciones en el sistema. Además, la cantidad de agua perdida por unidad de tiempo en fallas no reportadas aumenta debido al cambio de presión (Lambert et al., 1999). Los factores que pueden afectar cambios en la presión son: (i) características del consumo entre el día y la noche, (ii) El estado de uso del agua debido a los altos consumos durante el día, (iii) la frecuencia de las interrupciones en el agua, (iv) condición irregular de la presión en los sistemas que alimentan directamente a la red. El material de la tubería tiene un gran impacto en la relación presión-pérdida. Dependiendo de las características del material de la tubería, los distintos tipos de tubería se comportarán diferente ante un cambio en la presión, o frente a influencias externas (Lambert et al., 1999). La Ecuación FAVAD (2.48), que es una fórmula matemática que calcula el caudal de fuga utilizando un coeficiente de fuga, presión y exponente de presión que varía según tipo de sección y material de la tubería, provee la oportunidad de evaluar el nivel de la pérdida que pueda observarse en el sistema a cualquier nivel de presión. La frecuencia de las fallas en las conexiones del servicio es examinada antes y después del manejo de las presiones para analizar la relación presión-falla. La Ecuación 2.49 permite calcular el cambio en el número de fallas de acuerdo con un coeficiente N_2 y el cambio en la presión es utilizado para definir la relación presión-falla:

$$Q_1 = Q_0 \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{n_1} \quad (2.48)$$

$$\frac{B_0}{B_1} = \left(\frac{P_0}{P_1} \right)^{n_2} \quad (2.49)$$

donde Q_1 es el caudal de fuga después de la reducción de presión empleada; Q_0 es el caudal de fuga antes de la reducción de presión empleada; P_1 es la presión después de su reducción; P_0 es la presión antes de su reducción y n_1 es el exponente de la presión (0.5 para fugas de áreas demarcadas, 1.5 para fugas de áreas variables). Como se puede apreciar en la ecuación FAVAD, el nivel de pérdidas disminuye o aumenta

conforme el cambio en la presión en el sistema de distribución. En el estudio, los niveles teóricos de pérdida fueron calculados conforme los niveles del cambio en la presión que ocurrieron antes y después del PM en el área de aplicación piloto.

- **Área de estudio:** Se trabajó en un área de servicio de KASKI (Kayseri Water and Sewerage Administration). En el WDS de la ciudad de Kayseri, a principios del año 2019, las DMAs se habían creado dentro del alcance de combatir las pérdidas de agua y se planificaron 140 sub-regiones en este contexto. En el sistema de distribución central, 30 regiones habían sido aisladas, donde la integración SCADA fue llevada a cabo, por lo que los cambios en el flujo y la presión habían comenzado a ser monitoreados. Un sistema SCADA es una herramienta de automatización utilizada para controlar, supervisar, recopilar datos, analizar datos y generar informes a distancia mediante una aplicación informática. Se monitorearon regularmente los rangos del cambio del flujo en la región piloto aislada creada en el sistema de distribución central. El área de estudio se caracteriza por tener pequeñas facilidades en actividades comerciales y la densidad del alojamiento es limitada. La operación de negocios en esta región no tiene un consumo nocturno.
- **Flujo Mínimo Nocturno:** En la DMA, el flujo del sistema es monitoreado cuando el consumo es bajo (entre las 02:00 y 04:00 de la madrugada), y se evalúan potenciales fallas en la región. Aplicando el método MNF, las componentes se pueden monitorear diariamente y es posible identificar potenciales fugas. Para esto, los usuarios consumidores y las fugas profundas son substraídas del flujo de entrada, el cual es medido con MNF, pudiéndose calcular el valor de la filtración/pérdida. En este contexto, se utiliza la ecuación Bursts And Background Estimates (BABE) propuesta por IWA para calcular el consumo legal nocturno y las fugas existentes bajo el nivel de detección en la región. Este acercamiento considera estas fugas en conexiones de servicio y conexiones de servicio en propiedad privada. Para calcular, se requieren el largo principal (L_m), el número de conexiones al servicio (N_c), largo de la conexión de servicio en la propiedad privada (L_p) y el flujo nocturno promedio (AZNP).

$$BL = (20 \cdot L_m + [1.25 + 0.033 \cdot L_p] \cdot N_c) \cdot (50AZNP)^{1.5} \quad (2.50)$$

Así, una vez aislada la zona piloto, esta fue integrada al sistema SCADA y los cambios de presión y flujo comenzaron a ser monitoreados. De acuerdo con la ecuación BABE y a las características físicas de la red de estudio, las fugas bajo el nivel de detección (2.2 [L/s]) y el consumo nocturno legal (0.45 [L/s]) fueron calculados antes del PM. En la DMA, la observación comenzó el día 24/11/2019 y el MNF fue medido como 12.5 [L/s]. Considerando el perfil del usuario y las características de la red en la región, se predijo que una parte significativa del flujo, el cual es elevado, es una fuga potencialmente prevenible.

La presión del sistema al momento del MNF puede ser diferente a la presión observada debido al cambio en la demanda de agua en un período de 24 hrs en la región. En sistemas alimentados por gravedad, se observa que la presión al momento del MNF es más alta que la presión promedio por día o durante el día. Por otro lado, en caso del control de presión, la presión durante la noche es más baja que la monitoreada durante el día. En un sistema de control de presión sensible al flujo o ajustado al tiempo, se reduce más la presión por una PRV, debido a la baja demanda en la noche. Luego, el volumen de la fuga varía dependiendo de la presión en el área. En muchos sistemas, la presión cambia en un período de 24 horas, y por lo tanto la pérdida también cambia. Por lo tanto, el caudal (en [L/s]) de la filtración detectado por el MNF no se puede simplemente multiplicar por las 24 horas y la pérdida diaria (en [m³/a]) no se puede calcular. Por esa razón, en el análisis MNF, el factor día y noche (NDF), parámetro que se determina de acuerdo con las condiciones del sistema, debería ser calculado y tomado en consideración en lugar de tomar 24 horas para encontrar el valor volumétrico diario, mensual o anual del flujo que fue determinado y guardado por la metodología activa del control de pérdidas. El rango de variación del NFD se presenta en la Tabla 2.4, donde NFD_g corresponde al parámetro NFD

para sistemas que funcionan por gravedad, y NFD_p en caso de control de presiones, con las presiones medidas en un período, T_p , igual a 7 días.

En la Tabla 2.5, se presentan los valores NDF0 y NDF1, correspondientes al NDF antes y después del PM, respectivamente.

Tabla 2.4. Rango de variación del parámetro NFD según funcionamiento del sistema. Fuente: Lambert (2002).

Funcionamiento del sistema	Parámetro	Rango/Valor	Unidad
Gravedad	NDF_g	18-23	h/día
Control de presiones	NDF_p	24-30	h/día
	T_p	7	días

Tabla 2.5. Valores de NDF0 y NDF1. Fuente: Özdemir et al. (2021).

Parámetro	Valor	Unidad
NDF0	22.5	h/día
NDF1	23	h/día

El MNF mostró oscilación especialmente en el área piloto después del control de la presión. Adicionalmente, se tuvo en cuenta que las presiones bajo un estrés constante pueden producir nuevas fallas en el tiempo debido a la alta presión observada en la región, lo que causa un incremento de las pérdidas. Así, para reducir las pérdidas existentes en la región, se aplicaron métodos activos de control de pérdidas y métodos acústicos para identificar fugas no reportadas. Con este propósito, durante el período 24/11/2019 al 24/02/2020, se llevó a cabo la detección de fugas utilizando micrófonos ubicados en el subsuelo y pruebas de paso. A pesar de dificultades, como resultado de los estudios llevados a cabo en la región piloto, se piensa que pueden existir potenciales fugas por un total de 8-10 [L/s] en tres diferentes subregiones. Como resultado, aproximadamente 5.45 [L/s] de filtración fueron ahorrados en la región. Considerando un $NDF= 22,5$ [hrs/día] (determinado de acuerdo con condiciones físicas, topográficas y operacionales de la región), se logró un ahorro de un total de 441 [m³/día] y 161.130 [m³/año] de agua en la región.

- **Estimación del nivel de fugas con la ecuación FAVAD:** El nivel de filtraciones que puede alcanzarse técnicamente de acuerdo con cambio de presiones en la región piloto es estimado. Al ser la tubería de PE y PVC en la región aislada, el coeficiente $N1$ es asumido como 1.5. Así, para una presión de 91 [mca], la fuga es de 6.95 [L/s] bajo las condiciones iniciales, y, de acuerdo con la ecuación FAVAD, el nivel de pérdidas que pueden ocurrir para 31 [mca] de presión se calcula como 1.33 [L/s]. Las fugas bajo el nivel de detección se cuantificaron como 2.38 [L/s] antes del PM y 0.56 [L/s] después del PM.

Se observa que el valor calculado en la región de acuerdo con la ecuación FAVAD, el cual indica el nivel de filtración (1.33 [L/s]) es bajo, y es posible lograr ahorros significativos debido al decrecimiento en la presión. Al final del estudio, el cambio en el nivel total de pérdidas fue calculado como 5.34 [L/s]. Los volúmenes ahorrados fueron calculados considerando los parámetros NDF0 y NDF1 (antes y después del PM, respectivamente). De acuerdo con esto, se observa que se podrían ahorrar 118.5 [m³/día] de acuerdo con el total de pérdidas.

- **Control de presión en campo:** Luego de que la región piloto fuera monitoreada por un período determinado de tiempo, se observó que la zona aislada presentaba un aumento del nivel de presiones en el sistema, por lo que se instaló una válvula rompe presiones para implementar el PM. La región aislada tiene un punto de entrada y una tubería de 200 mm de diámetro. Así, para mejorar las condiciones de operación del sistema, se instaló un bypass de 150 mm de diámetro, desde la línea de 200 mm de diámetro y los 150 mm de diámetro de la válvula de control de presión, la cual puede ser controlada de forma remota. La región piloto fue determinada como punto crítico, y se determinó la presión límite requerida para prevenir los problemas que pudieran ocurrir debido a bajas presiones. De acuerdo con los trabajos de campo, la presión de salida fue seteada en 4 [bar] y luego a 3.1 [bar]. Luego de instalada la válvula rompe presiones, los cambios en la presión del flujo obtenidos del sistema

SCADA comenzaron a ser monitoreados. La condición física de la red es generalmente un promedio de los niveles en la región. De los trabajos en campo, se observa que el valor medido de MNF decrecieron a 3.29 [L/s] luego del control de la presión, y la filtración total es de 3.01 [L/s] luego de sustraer el uso nocturno legal (ecuación BABE). Inicialmente, el valor total de la pérdida era de 6.67 [L/s], y luego del PM, la reducción resultó ser de 3.66 [L/s] (lo que representa el 54.9%). Se puede observar que, a pesar de lo logrado por la aplicación del PM, la cantidad de fugas evitables aún son altas. Este flujo es el resultado de fugas ocurridas en la región y que no son reportadas, especialmente en conexiones de servicio. Así, para prevenir la ocurrencia de estas pérdidas, los puntos que presentan el problema se deben encontrar nuevamente con pruebas de paso y métodos acústicos. Al comparar los resultados de la aplicación del método FAVAD v/s los obtenidos en campo, se obtiene una diferencia de 1.70 [L/s] entre la filtración total teórica y medida. Esta diferencia probablemente aumente por las nuevas fugas que aparecerán por cambios de presión. De los datos del trabajo de campo, se observa que el nivel total de la filtración es de 78.4 [m³/día].

2.4. Simulación hidráulica de una red de distribución de agua

Antes de simular hidráulicamente la red de distribución de agua, es necesario tener un claro entendimiento sobre el funcionamiento de una válvula reguladora de presión.

2.4.1. Funcionamiento de PRV

La válvula reguladora de presión tiene la función de ajustar la presión que lleva el agua a la entrada de la válvula con respecto a la de salida de la válvula. Estos elementos se conforman de un piloto reductor, el cual actúa para ajustar la presión de salida que tendrá el agua, una válvula de generalmente 3 vías, un filtro para evitar obstrucciones y un manómetro donde se puede observar la presión de salida del agua.

Para regular una PRV, es necesario:

- (i) Asegurar que la válvula esté cerrada y que no haya agua fluyendo a través de ella.
- (ii) Localizar el anillo de ajuste en la parte superior de la válvula.
- (iii) Girar el anillo de ajuste en el sentido horario para aumentar la presión del agua o en el sentido contrario para disminuirla.
- (iv) Abrir la válvula.
- (v) Medir presión con manómetro en el punto de salida de la válvula.
- (vi) Si la presión no es la deseada, volver ajustar el anillo.
- (vii) Considerar que si se ajusta muchas veces una válvula, esta se puede dañar y reducir su vida útil.

La Figura 2.5, muestra los elementos importantes de una PRV. Cuando se ajusta el tornillo grande conocido como piloto reductor, el resorte de ajuste actúa sobre la válvula principal, adaptando el espacio por el cual pasa el flujo, modificando la presión de este.

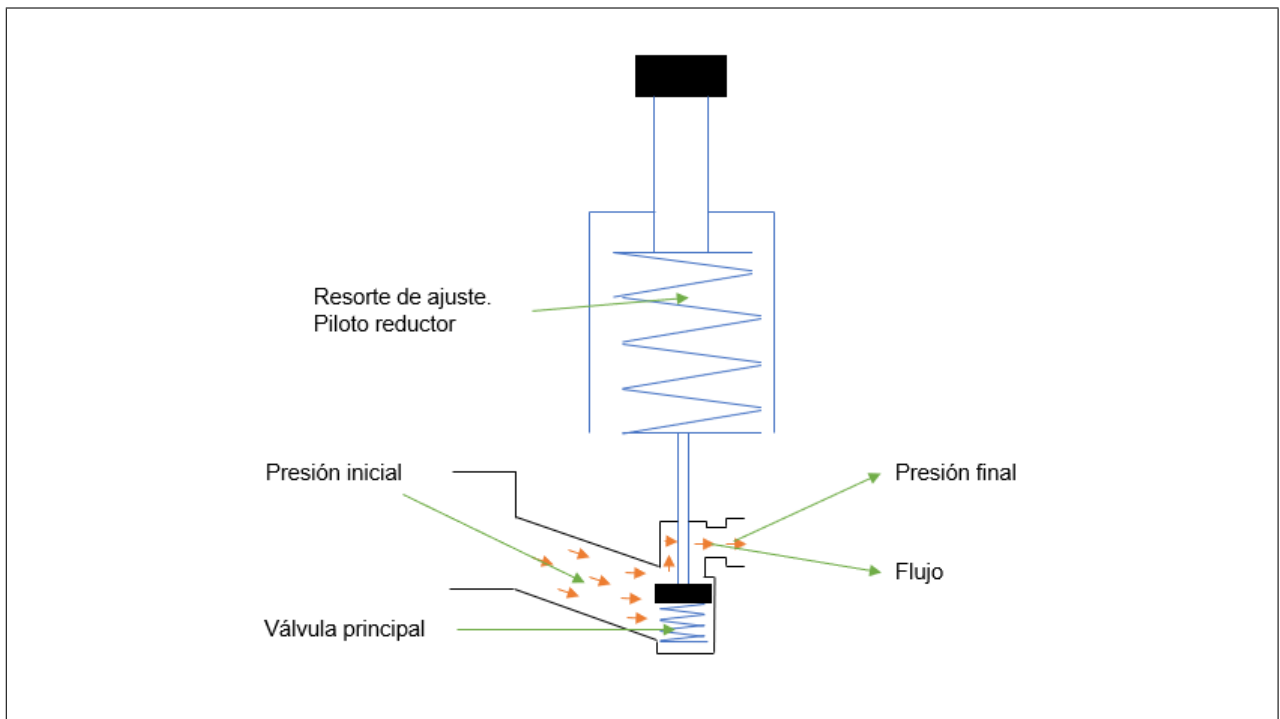


Figura 2.5. Elementos de una PRV. Fuente: Elaboración propia.

2.4.2. Modelo Hidráulico

Un modelo hidráulico corresponde a la construcción abstracta de una red de distribución de agua. Para ello, es necesario considerar los elementos de una red de agua potable, los cuales poseen una localización determinada dentro de la red y propiedades elementales que influirán en el comportamiento de las métricas hidráulicas en el tiempo de simulación.

2.4.2.1. Elementos abstractos en un modelo hidráulico

En una primera instancia, la red se compone de nodos y vectores, los cuales en conjunto se pueden abstraer como un grafo matemático $G=(V,C)$, donde V es el número de nodos que conforman la red, y C el número de conexiones que unen dos nodos del conjunto V . Las propiedades geométricas de las conexiones serán dos coordenadas planimétricas y una altimétrica. Si se considera que un vértice está asociado a un estanque, cliente o planta de tratamiento, se debe asignar un caudal (de entrada o de salida), lo que representa el flujo en este punto. Un modelo simplificado es aquel que aplica la condición estacionaria, donde este flujo se considera constante. En modelos complejos, los caudales se modelan como funciones que representan patrones temporales de consumo del cliente, o bien, patrones de oferta, dependiendo si son caudales de consumo o de ingreso de agua al sistema, respectivamente. En ambas situaciones la forma de modelar es distinta: si se trata de consumo, este se representa como salida de caudal, cuyo comportamiento se explicita en los patrones de consumo, y si se trata de un ingreso de agua al sistema, se modela una presión impuesta en el nodo de entrada que no es necesariamente constante (Fernández, 2021).

2.4.2.2. Predicción de comportamiento del modelamiento hidráulico

Dentro de la red de distribución siempre se cumplirá la conservación de masa en cualquier punto. Luego, las características del flujo vienen dadas por la presión que actúa sobre el agua, la cual varía de forma espacial y temporal. La variación de presión de forma espacial ocurre por varios motivos: (i) presencia de elementos que ocasionan la pérdida singular, como por ejemplo válvulas, (ii) diseño topológico de la red, como por ejemplo pérdida singular debido al cambio de dirección

en la red, para lo cual se utilizan distintos tipos de uniones, y (iii) rugosidad de las tuberías, lo que depende del material de estas. La variación de tipo temporal ocurre principalmente por cambios en la demanda y al comportamiento dinámico del flujo (Fernández, 2021).

En el presente trabajo se considerará el comportamiento propuesto por la *Environmental Protection Agency* de EE.UU (EPA), debido a la compatibilidad que presenta, ya que al trabajar con lenguajes de código abierto y además emplear la extensión *.inp* como formato de archivo de entrada y de salida, se abre la posibilidad de poder trabajar en complemento con programas utilizados globalmente como *EPANET* o *WaterCAD* y así extender el alcance de los resultados obtenidos mediante este complemento.

2.4.3. Modelamiento basado en demanda y demanda de presión

La simulación hidráulica puede contemplar el análisis de la demanda y el análisis de la demanda de presiones. Para ambos modelos se utilizan supuestos distintos, los cuales se detallan a continuación:

- **Modelo basado en el análisis de demanda:** Considera que se satisface cada demanda en la red. Por esto, se disminuye el tiempo de cálculo. En el modelo basado en el análisis de la demanda, la presión en el sistema depende de la demanda del nodo. El balance de masa y las ecuaciones de pérdida de presión se resuelven asumiendo que la demanda en los nodos se conoce y se satisface. Es razonable utilizar este supuesto bajo condiciones normales de simulación, ya que ante escenarios de amenazas naturales, no siempre se satisface la demanda.
- **Modelo basado en el análisis de demanda de presión:** Ante situaciones que obligan a una baja de presión en el sistema (como por ejemplo incendios o filtraciones en el sistema), los consumidores no siempre reciben la demanda esperada. Es por esto que el modelo basado en el análisis de demanda de presión aparece como una alternativa más adecuada para representar la situación. En este modelo, la demanda entregada depende

de la presión. Las ecuaciones de balance de masa y de pérdida de presión se resuelven simultáneamente, determinando la demanda a lo largo de la red con las presiones y caudales. La relación que explica lo anterior se presenta en la ecuación 2.51.

$$d = \begin{cases} 0 & P_0 \leq p \\ D_f \left(\frac{p-P_0}{P_f-P_0} \right)^{1/e} & P_0 \leq p \leq P_f \\ D_f & p \geq P_f \end{cases} \quad (2.51)$$

donde d es la demanda actual (m^3/s), D_f es la demanda deseada (m^3/s), p es la presión (Pa), P_f es la presión requerida (Pa) -la cual corresponde a la presión sobre la cual el consumidor debería recibir la demanda deseada, y P_0 es la presión mínima (Pa) - la cual corresponde al valor de la presión bajo el cual el consumidor no recibe agua, $1/e$ es el exponente de la presión, generalmente igual a 0,5.

En el presente trabajo se desean minimizar las pérdidas mediante la optimización de presiones, por lo que para representar la realidad de mejor forma, se empleará el segundo modelo descrito, es decir, el modelo basado en el análisis de demanda de presión (PDD).

2.5. Modelación en software WNTR

En el presente trabajo se modelarán hidráulicamente redes experimentales utilizando WNTR. Las redes experimentales son redes de distribución de agua creadas en WNTR con el objetivo de extraerles sus características hidráulicas antes y después de la implementación de la metodología. A continuación, se describirán las características de operación del software, el cual se deconstruye en Python y es gratuito. El programa es desarrollado por una colaboración entre la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, Laboratorios Nacionales Sandia y la comunidad de código abierto.

2.5.1. Lenguaje de programación

Se utiliza el lenguaje de programación Python, principalmente con el fin de maximizar la compatibilidad, ya que es un lenguaje de código abierto y compatible con múltiples sistemas operativos. Específicamente, en el presente trabajo se emplea la distribución de Conda en su versión 3.8.

2.5.2. Paquetes informáticos

Como se mencionó anteriormente, el modelamiento hidráulico se realiza ocupando el paquete para Python 3.8 *Water Network Tool for Resilience* (WNTR), que fue desarrollado por la EPA. El paquete es similar al sistema EPANET, ya que emplea los mismos métodos de cálculo, pudiendo importar y exportar archivos del formato principal de dicho software (.inp). Sin embargo, EPANET funciona con el modelo de análisis basado en demanda, lo que es aceptable bajo condiciones normales de funcionamiento, lo cual no aplica para el presente trabajo. Al ser programable, WNTR minimiza el tiempo que se debe emplear en crear una red de distribución, mientras que EPANET requiere la creación manual de esta.

Para un estudio completo, es necesario complementar el paquete WNTR con otros paquetes, los cuales se enuncian a continuación:

- SciPy: integración numérica eficiente.
- NetworkX: análisis de redes y grafos.
- Matplotlib: generación de gráficos.
- NumPy: trabajo con matrices.
- Pandas: análisis de series de tiempo.

2.5.3. Elementos y caracterización

Para modelar una red de distribución en WNTR, es necesario describir los siguientes elementos:

- Reservorios: reservas masivas de agua. Pueden ser lagos o embalses.

- Uniones: punto donde se produce una unión o bifurcación del flujo de agua.
- Tuberías: conductos que transportan agua u otros fluídos. Puede ser de diversos materiales.
- Válvulas: elemento que sirve para regular el flujo de los fluidos disminuyendo la energía.
- Bombas: elemento que inyecta energía al sistema.
- Patrones: modelo o pauta que describe cuantitativamente el comportamiento de la demanda en la zona.
- Fuentes: punto donde ingresa flujo a la red.
- Opciones de simulación: alternativas que buscan modelar de la mejor forma posible los supuestos utilizados.

Por último, WNTR permite extraer las métricas descritas en las Tablas 2.2 y 2.3 para determinar cuantitativamente el desempeño de la red en un contexto determinado, como por ejemplo en un escenario base y otro con amenaza incluida.

2.6. Red neuronal entrenada mediante aprendizaje por refuerzo

Para trabajar con redes neuronales, es necesario tener clara la diferencia entre Inteligencia Artificial, Aprendizaje de máquinas (Machine Learning, ML) y Aprendizaje profundo (Deep Learning, DL). El objetivo de la inteligencia artificial es crear procesos automáticos que funcionen como uno esperaría que fuera un comportamiento inteligente (como los humanos). Estos procesos automáticos funcionan como algoritmos que a partir de la experiencia mejoran la tarea, midiendo con métricas el desempeño obtenido en cada paso de tiempo, como es el caso del aprendizaje de máquinas.

El aprendizaje de máquinas es utilizado para encontrar comportamientos o patrones que no son fácilmente observables de una gran cantidad de información.

El DL se encuentra dentro del ML, y por lo tanto, dentro de la inteligencia artificial (Chollet, 2017). Al ser un subconjunto del aprendizaje de máquinas, también se basa en experiencia, tarea y métrica, pero con la diferencia de que el algoritmo aprende a representar de la mejor manera

posible los datos de entrada dados por el experto. Las diversas representaciones de los datos de entradas, que tienen como objetivo generar el aprendizaje, se denominan capas, y se representan en una red neuronal.

Las dos grandes áreas de aprendizaje tradicional de aprendizaje de máquinas son: (1) aprendizaje supervisado y (2) el aprendizaje no supervisado. A continuación, se realiza una breve descripción de cada uno:

- (i) Aprendizaje supervisado: datos para entrenamiento incluyen solución deseada llamada etiqueta.
- (ii) Aprendizaje no supervisado: datos de entrenamiento no incluyen etiquetas, y el algoritmo intentará clasificar o descifrar la información por sí mismo.

Una opción adicional es el aprendizaje por refuerzo. Este tipo de aprendizaje no incorpora una etiqueta de salida. Sin embargo, no es un tipo de aprendizaje supervisado, y tampoco es un tipo de aprendizaje no supervisado. La principal diferencia, es que el aprendizaje por refuerzo viene a dar una respuesta a la especificidad de aprendizaje de máquinas supervisado y no supervisado. Mientras estos dos últimos aprendizajes son de clasificación o predicción y requieren grandes conjuntos de datos de entrenamientos (Royal Society of Great Britain, 2017), el aprendizaje por refuerzo intenta hacer aprender a la máquina basándose en un esquema de recompensas y penalidades en un entorno donde se deberá tomar acciones por parte del algoritmo, las cuales incluyen un conjunto de variables partícipes del problema que se quiere resolver.

2.6.1. Perceptrones multicapa

Una red neuronal o perceptrón multicapa, apunta a imitar el comportamiento del cerebro, donde se traspa la información entre sus neuronas, intentando imitar su forma de aprendizaje. La aplicación artificial viene dada por una unidad fundamental: el perceptrón.

Un perceptrón es una unidad (neurona) que pondera señales de entrada y produce señales de salida mediante una función de activación. Más detalladamente, recibe valores (información) x_k (pueden

ser binarios), que poseen un peso (w_k), que representan la capacidad de las dendritas, y también una salida, y . Aquí, la acumulación de información viene dada por: definir una variable u , que da cuenta de la cantidad de información que está acumulando el perceptrón, ponderar entradas: $x_1w_1+x_2w_2+..+ b$ (sesgo) y por último, la salida, o función de activación ($f(u)$). El sesgo se tiene como respuesta en caso de que todos los pesos o valores sean 0. Luego, muchos perceptrones formarán una capa, y una red puede tener múltiples capas. El aprendizaje de las redes tiene directa relación con los pesos asociados. El algoritmo más utilizado es el algoritmo de retropropagación (Ramchoun et al., 2016).

También existen redes neuronales convolucionales, las cuales son mayormente utilizadas para detección de imágenes. Estas redes neuronales convolucionales pueden presentar arquitecturas en tres dimensiones, y sus datos de entrada son matrices. Dentro de las redes neuronales convolucionales, se encuentran dos procesos: (1) convolución y (2) sub-muestreo (Lobos, 2022).

- (i) Convolución: aplicar transformación a subconjunto de la matriz mediante un producto escalar con una matriz denominada filtro (Lobos, 2022).
- (ii) Sub-muestreo: consiste en disminuir en una medida aún mayor la cantidad de conexiones en la red, empleando un algoritmo de agrupación máxima, el cual consiste en incorporar características relevantes en las capas de convolución a una nueva etapa, que se denomina de agrupación. Esta última consiste en escoger una serie de subconjuntos de los datos para cada filtro y obtener el mayor valor (Lobos, 2022).

Generalmente, las redes neuronales se componen de una capa de entrada, donde se recibe la información y donde también el número de neuronas es igual al número de entradas del sistema, una o más capas llamadas capas ocultas, que modifican las dimensiones del problema, y una capa final llamada capa de salida, donde se obtiene una respuesta por parte de la red.

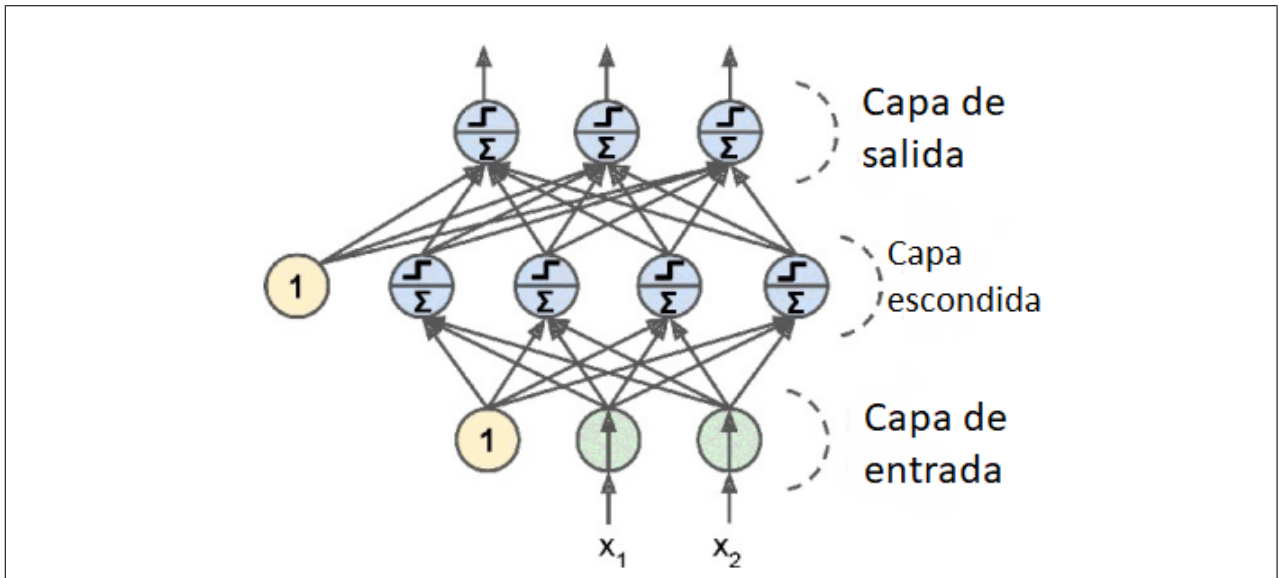


Figura 2.6. Red Neuronal. Fuente: Géron (2017).

En la Figura 2.6 se observa una red neuronal, donde cada neurona se conecta con las neuronas de la capa siguiente y la anterior. Esta conexión se da mediante la ponderación explicada anteriormente, donde las neuronas de la capa anterior tienen un peso asociado w_k . La respuesta de la red se obtiene mediante la función de activación $f(u)$.

2.6.2. Funciones de Activación

Las neuronas artificiales que se encuentran en la capa de entrada ponderan la información, para luego pasar por la función de activación o transferencia, la cual modifica o activa a las neuronas participantes. Esto le da un carácter no lineal a las redes neuronales (Lau & Lim, 2018). Existen varias funciones de activación desarrolladas a lo largo del tiempo, como la step (escalón), sigmoid (aproximación continua a la función escalón), tanh, lineal y ReLu. Esta última función de activación es la más utilizada por su simplicidad y eficiencia en el entrenamiento de la red (Lau & Lim, 2018). El conjunto de valores resultante se encuentra en un rango acotado como (0,1) o (-1,1). Su definición se resume como 0 si $u < 0$ y 1 si $u > 1$. Las ventajas de la función ReLu con respecto a las otras funciones de activación mencionadas incluyen (Albawi & Mohammed, 2017):

- (i) Tiene un gradiente constante o nulo. Esto favorece el entrenamiento de los modelos, pues se evita el problema de desvanecimiento de gradiente.
- (ii) Se define de forma simple en su función y gradiente.

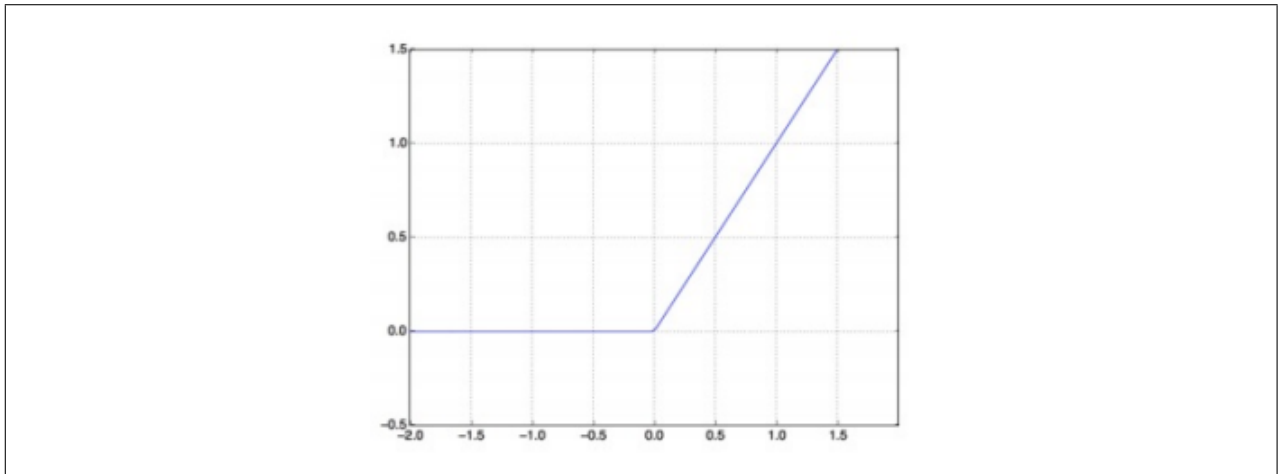


Figura 2.7. Función de activación ReLu. Fuente: Chollet (2017)

Como se mencionó anteriormente, el rango de valores de salida está acotado entre, generalmente, (-1,1), y variaciones en este rango permiten combinar entradas de distintas maneras. Como se ve en la Figura 2.7, la función relu está acotada entre 0 y 1. La función tanh (tangente hiperbólica) emite la misma distribución en un rango (-1,1).

2.6.3. Aprendizaje por refuerzo

Es así como se puede trabajar con tres tipos de aprendizaje en el ML: por refuerzo, supervisado y no supervisado. El aprendizaje por refuerzo funciona con un agente tomando una acción dentro de un ambiente en un tiempo t , donde el ambiente devuelve dos tipos de información al agente:

- (i) **Recompensa:** Valor escalar que provee un feedback cuantitativo de la acción que el agente tomó en el tiempo t . El objetivo del agente es maximizar los premios acumulados.
- (ii) **Estado:** Mide el cambio en el ambiente en respuesta a las acciones del agente.

Al tener una gran cantidad de iteraciones, se tendrá una gran cantidad de premios y estados para cada simulación. Lo anterior hasta un estado terminal, el cual podría ser alcanzado obteniendo el premio máximo, o logrando algún desempeño deseado.

2.6.4. Procesos de decisión de Markov

Los problemas de aprendizaje por refuerzo se pueden definir matemáticamente como procesos de decisión de Markov (MDPs). Así, los MDPs muestran las propiedades de Markov, donde se asume que el instante analizado de tiempo contiene toda la información pertinente acerca del estado del ambiente en instantes previos al analizado. Formalmente, un MDP es una tupla $M = \langle S, A, \phi, R \rangle$ (Puterman, 2014).

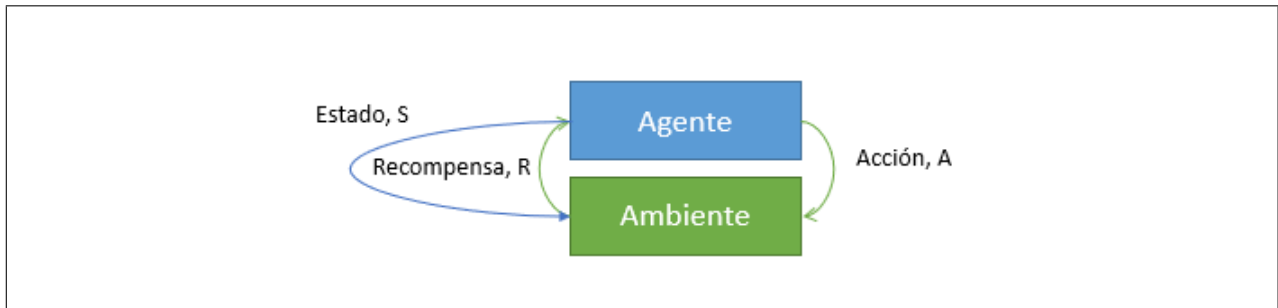


Figura 2.8. Proceso de decisión de Markov. Fuente: (Puterman, 2014).

La Figura 2.8 muestra un diagrama del funcionamiento del proceso, donde S es el set de todos los posibles estados. Siguiendo la convención de teoría de set, cada posible set (es decir, una combinación particular de variables del escenario) está representado por la letra s . A es el set de todas las posibles acciones, R corresponde a la distribución de premio dado un par estado-acción (Puterman, 2014). Cuantifica qué tan correcto es el desempeño de lo que se está probando por parte del entorno, dados un estado y acción en particular, denotados (s, a) . Es una distribución de probabilidad. Puede que un mismo par (s, a) obtenga distintas cantidades de premio en diferentes ocasiones. P , como R , también es una distribución de probabilidad. En este caso, P representa la probabilidad del siguiente estado $(s + 1)$ dado un par (s, a) en el tiempo t . El parámetro γ es un hiper-parámetro llamado factor de descuento (o decaimiento). Es un valor que sirve para comparar

el premio de situaciones distintas que ofrezcan la misma recompensa para $\gamma=1$. Si γ cambia su valor, el valor del premio para ambas situaciones podría ser distinto.

2.6.5. Valor Óptimo

A lo anterior, se le suma el último objetivo de encontrar una función que permita a un agente tomar una acción a_i (del set de todas las posibles acciones, A) cuando encuentre un estado s , del set de todos los posibles estados del ambiente, S . Esto es, sin importar la circunstancia particular en la que el agente se encuentre, la función responde al algoritmo que debería seguir el agente para maximizar su premio. Se tiene un diagrama como el de la Figura 2.9, donde $J(\pi)$ es la función objetivo, a la cual se le puede aplicar técnicas de aprendizaje de máquinas para maximizar el premio, π es la función que sirve para ir de S a A y π^* es una función optimizada. Es decir, dado cualquier estado, la función retornará una acción a que llevará al agente a obtener el premio máximo posible.

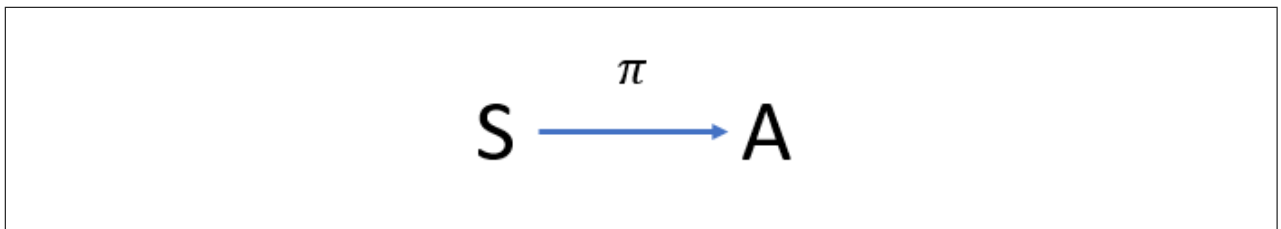


Figura 2.9. Representación valor óptimo. Fuente: Elaboración propia.

2.7. Algoritmo Genético

El algoritmo genético se basa en la Teoría de Selección Natural de Darwin, donde la medida de adaptación al problema por parte de un gen determina su probabilidad de presencia en las generaciones futuras. El algoritmo es de búsqueda, por lo que para este caso se simula para el tiempo de simulación completo. También, corresponde a un algoritmo iterativo, y la iteración finaliza si se llega a un óptimo o si se alcanza el máximo de iteraciones. De esta forma, el algoritmo inicia creando una población, al principio, de forma aleatoria, y luego evaluar el desempeño según la métrica asignada. Luego, el valor que está más cerca del óptimo buscado es el que se guarda

como el mejor en todas las iteraciones y se actualiza si se encuentra otro mejor. Esto se conoce como elitismo, y es importante mencionar que esto no hace de toda la población individuos nuevos sino que un porcentaje acotado de los mejores evoluciona. Mucho elitismo tiene poca variedad y se pierde exactitud. Luego, se produce la selección de individuos, la cual puede ser al azar o por torneo (donde se elige el que tiene mayor puntaje o recompensa luego de escoger aleatoriamente una cantidad determinada de individuos). Estos individuos serán los padres de la nueva generación. Posterior a la selección, se producirá el cruce, donde se seleccionan los individuos seleccionados en pareja (Sivanandam et al., 2008). El cruce es modelado por una distribución de probabilidad, y si este se produce, resultan nuevos individuos. Si el cruce no se produce, la pareja pasará a la siguiente generación para ser evaluada. El cruce se realiza mediante un corte, donde una fracción determinada de los genes se transferirá a los hijos. Por último, la mutación también funciona con una probabilidad de mutación, lo que implica que, si un individuo es mutado, uno de sus genes es modificado.

3. METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA LOCALIZACIÓN DE VÁLVULAS Y OPTIMIZAR LAS PRESIONES EN LA RED DE AGUA POTABLE

La metodología para optimizar las presiones en la red de agua potable se divide en dos aristas:

- (i) Determinar cuáles son las válvulas candidatas en la red, y dónde deben ir ubicadas.
- (ii) Ajustar la apertura de las válvulas que el modelo sugiera, con el objetivo de optimizar la presión en la red de distribución. Esto último se traduce en variar la presión de control de estas válvulas de modo que las presiones en la red sean óptimas. Esta parte, se divide a la vez en dos secciones, ya que se utilizarán redes neuronales y algoritmo genético para realizar la optimización.

3.1. Metodología para determinar las válvulas candidatas en la red y su localización

En esta sección, se describe el procedimiento que se debe seguir para determinar el número de válvulas candidatas y su localización en la red de distribución de agua, lo cual contempla el modelo hidráulico, la obtención de los valores de influencia de cada válvula en cada tubería, y la métrica desarrollada y utilizada en el presente trabajo.

3.1.1. Modelo hidráulico

Se modela la red de distribución de agua para un período de un día, empleando información topológica y geométrica de la misma, así como también una estimación del comportamiento de la demanda, en forma de patrones de consumo. Más precisamente, la información incluye cantidad de nodos, largo de tuberías, cantidad de fuentes o reservorios, presión en las fuentes o reservorios, pendiente, etc. Una vez realizado lo anterior, corresponde extraer los caudales en las tuberías y las presiones en los nodos del modelo hidráulico. Lo último corresponde a caudales y presiones base, respectivamente. Más generalmente, lo anterior representa el escenario base, y con este se compararán los resultados obtenidos por parte del algoritmo.

3.1.2. Desarrollo de métrica representativa de evaluación de desempeño de válvulas en la red de distribución

Se propone trabajar con la métrica denominada influencia, la cual evalúa el desempeño de una válvula en la red de agua. El modelo de fugas utilizado es el del simulador de WNTR, donde estas se agregan como nodos a cierta distancia de la tubería donde existe fuga (la mitad de la tubería para este caso), los cuales poseen una demanda o caudal de fuga, y son modeladas según lo propuesto por Crowl y Louvar (Klise et al., 2017) en la Ecuación 3.1:

$$d_{leak} = C_d A \sqrt{2gh} \quad (3.1)$$

donde d_{leak} es el caudal de fuga [m^3/s], C_d es el coeficiente de descarga [-], que es igual a 0.75 para flujo turbulento, A es el área de la fuga [m^2], g es la aceleración de gravedad, igual a $9.8 m/s^2$ y h es la altura de presión [m]. Asumiendo que las fugas grandes no se dan en tuberías de acero, se fija el valor de α en 0.5 Lambert (2001). Es importante mencionar que la Ecuación 3.1 es adimensional y es el resultado de realizar un balance de energía mecánica de la situación de fuga en tubería.

El área de la fuga se calcula mediante la Ecuación 3.2:

$$A = C_L \cdot A_{pipe} \quad (3.2)$$

donde C_L es un coeficiente porcentual que pondera al área transversal de la tubería, A_{pipe} [m^2]. La Ecuación 3.3 permite calcular el área transversal de una tubería:

$$A_{pipe} = \pi \cdot \frac{D_{pipe}^2}{4} \quad (3.3)$$

donde D_{pipe} es el diámetro de la tubería [m].

En el presente trabajo, se usó C_L elegido aleatoriamente de una distribución gamma cuyo parámetro de forma se calibra con el objetivo de obtener fugas cuyo porcentaje con respecto a la demanda esperada corresponda al 20-30% para simular una situación más cercana a la realidad. Luego, si se reemplaza la Ecuación 3.3 en la Ecuación 3.2 y a la vez se reemplaza la Ecuación 3.2 en la Ecuación 3.1, queda la Ecuación 3.4:

$$d_{leak} = C_d C_L \pi \frac{D_{pipe}^2}{4} \cdot \sqrt{2gh} \quad (3.4)$$

Al añadir una válvula con cierta presión de control en una tubería determinada de la red, es posible extraer la presión en el tiempo en cada nodo de la misma, en forma de matriz de presiones para toda la red. Teniendo la matriz de presiones para la red antes de añadir la válvula, se puede determinar la matriz de diferencias de caudal de fuga comparando el escenario base con el escenario de la red con válvula en cierto nodo, donde cada elemento de diferencia de caudal de fuga se calculará, para un nodo i , como:

$$d_{leak_{base,i}} - d_{leak,i} = \frac{C_d C_L \pi \sqrt{2g}}{4} \cdot D_{pipe}^2 (\sqrt{h_{i,base}} - \sqrt{h_{i,t,p_{control}}}) \quad (3.5)$$

donde $h_{i,base,t}$ y $h_{i,t,p_{control}}$ representan la presión del nodo i en un tiempo t de un escenario sin válvulas y la presión del nodo i en un tiempo t para una presión de control $p_{control}$, en un escenario con válvula respectivamente. Se denomina influencia al término $D_{pipe}^2 (\sqrt{h_{i,base}} - \sqrt{h_{i,t,p_{control}}})$, que es un parámetro que da cuenta del cambio de presión en un nodo i cuando a una red sin válvulas se le agrega una válvula con una presión de control determinada en algún nodo de la misma, en forma de tubería. El valor que se guardará y que quedará definitivamente como influencia, es la normalización por presión base de la parte no constante de la diferencia de caudales de fuga entre un escenario base y otro con válvula en algún nodo i , es decir, la Ecuación 3.6:

$$I_{t,i,j} = \frac{d_{leak_{base,t_i}} - d_{leak_{t_i,j}}}{P_{base,t_i}} \cdot \frac{4}{C_d C_L \pi \sqrt{2g}} \quad (3.6)$$

donde $I_{t,i,j}$ es la influencia del nodo i en el tiempo t , resultante de añadir la válvula en el nodo j .

3.1.3. Conexión de válvulas a la red

Una vez caracterizado el escenario base y realizado el análisis de influencias, corresponde conectar las válvulas sugeridas. Estos elementos se añaden en la red realizando un split (duplicado) de cada nodo final de la tubería analizada si el flujo es positivo en dicho elemento, y en el nodo inicial de la tubería analizada si el flujo es negativo en dicho elemento. La válvula, que es de tipo PRV, se añade como una tubería que conecta el nodo analizado con el nodo duplicado, donde este último posee las mismas características que el nodo analizado. El '*setting*' de la válvula corresponde a la apertura de la misma, o a la presión de control. Este parámetro se deja como variable a controlar en el problema. En esta instancia, corresponde conectar todas las válvulas sugeridas con el objetivo de analizar el efecto que una tiene sobre otra.

3.1.4. Modelación y extracción de resultados representativos

Se cuenta con un vector de una cantidad determinada de valores denominado $P_{control_{vect}}$, el cual contiene 20 valores de presión de control entre 4 y 30 mca para la válvula que se añade. Luego, para cada valor dentro de $P_{control_{vect}}$, se recorre tubería por tubería la red sin válvulas y en cada paso se añade una válvula siguiendo lo explicado en el punto anterior. Es decir, para cada valor de presión de control, $p_{control}$, dentro del vector de presiones de control, se añade una válvula y se extraen resultados de presión en todos los nodos de la red, para luego eliminar la válvula y pasar al siguiente nodo. Más detalladamente, para cada tubería y presión de control dentro del vector $P_{control_{vect}}$:

- (i) Se añade la válvula.
- (ii) Se extraen resultados de presión en cada nodo de la red.
- (iii) Se calcula la influencia en todos los nodos de la red, de poner la válvula en el nodo j , con la presión de control $p_{control}$.
- (iv) Se calcula la influencia acumulada y promedio del escenario, sumando o promediando los valores de la matriz anterior, respectivamente.
- (v) Se elimina la válvula.

(vi) Se analiza la siguiente tubería.

(vii) Una vez se probó la válvula en todas las tuberías de la red, se pasa al siguiente valor de $p_{control}$ en el vector $P_{control_{vect}}$ y se repite el procedimiento.

Lo anterior se resume en la Figura 3.1, donde se muestra que se instalan válvulas en cada nodo de la red de distribución para una presión de control y se extraen los resultados mencionados. Una vez se calcula la influencia con los resultados anteriores, se elimina la válvula en el nodo analizado y se añade en el nodo $i + 1$. Se repite el proceso hasta que se realiza lo anterior en el último nodo de la red. Una vez hecho lo anterior, se repite el algoritmo para la siguiente presión de control.

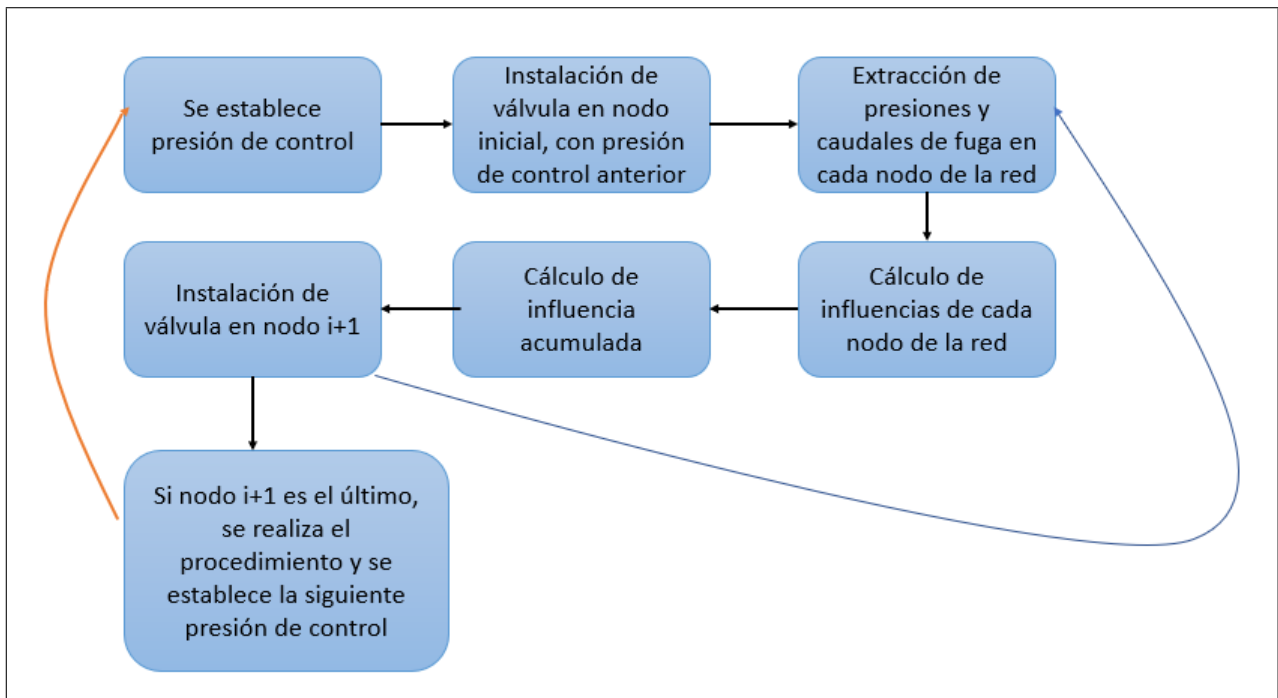


Figura 3.1. Diagrama de funcionamiento de cálculo de influencias y colocación de válvulas. Fuente: Elaboración propia.

Como resultado, se tendrá una matriz de influencias acumuladas para cada tubería/nodo, para cada presión de control, como la que se muestra en 3.7:

$$\begin{pmatrix} I_{acum_{p_1,1}} & I_{acum_{p_1,2}} & \cdots & I_{acum_{p_1,n}} \\ I_{acum_{p_2,1}} & I_{acum_{p_2,2}} & \cdots & I_{acum_{p_2,n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{acum_{p_N,1}} & I_{acum_{p_N,2}} & \cdots & I_{acum_{p_N,n}} \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

donde el valor $I_{acum_{p_N,n}}$ será la suma de todas las influencias (influencia acumulada) de todos los tiempos de probar la válvula en la tubería n, con la presión de control p_N . La variación de la influencia en cada tubería conforme varía la presión de control tendrá un comportamiento determinado, el cual se analizará en la sección de Resultados. Sin embargo, es necesario introducir la idea de que mientras menos controle una válvula (mayor presión de control), menos influencia tiene en el comportamiento de la red.

El objetivo de lo anterior es obtener la influencia que cada válvula tiene en cada nodo. Es decir, se añade una válvula en un nodo y se extraen las presiones asociadas, lo que resulta en un vector de influencias para todos los nodos en la red. Luego, se elimina la válvula y se añade en otro nodo de la red.

3.1.5. Medida de la influencia y resultado

Una vez obtenida la matriz 3.7, será posible obtener una lista de las tuberías cuya influencia es distinta de 0. Se analizan valores positivos y negativos, ya que una influencia negativa en algún nodo significa que la presión en este aumenta al añadir la válvula en el nodo i .

3.1.6. Selección definitiva de válvulas candidatas

Luego de tener la primera lista de influencias, es necesario tener en cuenta que esto representa el efecto en la red de poner una válvula en un nodo. Por lo tanto, hasta ahora el análisis no tiene en cuenta el efecto de una válvula sobre otra, por lo que podrían quedar válvulas redundantes en la red. Para resolver este problema, se trabaja con influencias marginales. Se denomina influencia marginal al descuento del efecto producido por una válvula ya seleccionada sobre otra que se está evaluando

seleccionar. De esta forma, teniendo la matriz de influencias para todas las presiones de control, es necesario ir seleccionando todas las válvulas candidatas y evaluar el efecto que estas tienen en la lista de válvulas que quedan por probar. El valor acumulado de esta operación, permitirá generar una lista de influencias marginales acumuladas correspondientes a cada válvula candidata, donde la elección sobre la cantidad de válvulas que queden queda a criterio propio. En este caso, se mostrará que un buen parámetro es seleccionar aquellas válvulas cuya influencia marginal acumulada es mayor al 15% de la influencia de la primera válvula puesta, es decir, la que tiene mayor influencia acumulada. El valor anterior se determinó de forma experimental, pero puede variar según el umbral de porcentaje de influencia acumulada aceptable que posea el modelador.

3.2. Metodología para ajustar apertura de las válvulas con Inteligencia Artificial

Es importante tener en cuenta que la metodología descrita anteriormente fue armada con el objetivo de determinar la localización de válvulas en una red de distribución de agua, y por lo tanto, la cantidad de válvulas que debería ir en la red. La metodología que se describe a continuación, se desarrolla con el objetivo de ajustar la apertura de las válvulas seleccionadas con la metodología anterior, es decir, se describen las variables consideradas para el problema, el cual se resuelve utilizando dos caminos distintos. Esta metodología de ajuste de apertura, la cual se simula mediante presión de control por parte de una PRV, será utilizada sobre válvulas ubicadas en los estanques, para posteriormente comparar resultados. Por lo tanto, el análisis queda orientado a la comparación de los resultados mencionados, es decir, de optimización de presión en válvulas sugeridas por algoritmo versus optimización de presión en válvulas sobre estanques.

La apertura de las válvulas se trabaja como una metodología que usa una presión de control, cuya unidad es mca (metros columna de agua). Se utilizará inteligencia artificial para determinar qué presión de control será el setting óptimo de cada válvula candidata. En particular, se utilizarán dos metodologías distintas:

- (i) Red neuronal entrenada mediante aprendizaje por refuerzo.
- (ii) Algoritmo Genético.

Ambos algoritmos se corren en WNTR y son hechos para ajustar la apertura de las válvulas.

3.2.1. Red neuronal

Una vez determinadas las válvulas candidatas en la red y su localización, es necesario saber qué tan abiertos o cerrados deben estar estos elementos de modo que se controle la presión en la red de distribución para reducir las pérdidas de agua.

Se realizará la optimización utilizando una red neuronal cuyo aprendizaje sea por refuerzo y, por lo tanto, la modelación se debe realizar para pasos de tiempo. Además, la red neuronal es un algoritmo de búsqueda, por lo que converge en el valor luego de simular para pasos de tiempo.

3.2.1.1. Creación del entorno

Se crea el entorno, el cual se compone de un inicio, un paso y un final. El resumen se muestra en la Figura 3.2.

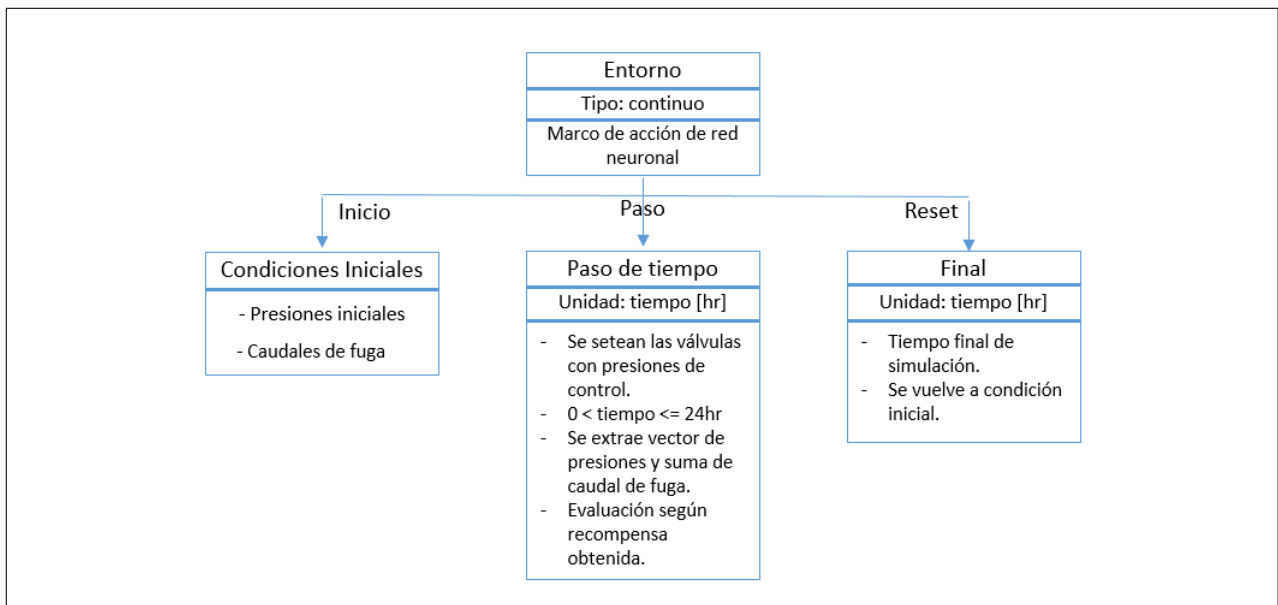


Figura 3.2. Diagrama de funcionamiento del entorno para una red neuronal. Fuente: Elaboración propia.

- (i) Inicio: Se establecen los valores de las condiciones iniciales. Para efectos de la modelación, la condición inicial viene dada por la red con fugas aleatorias en todas sus tuberías y válvulas candidatas añadidas pero sin controlar la presión. Para esto, se les asigna una presión de control alta, de modo que no controle la presión en el nodo. La simulación otorgará resultados de presión base y caudal de fuga base, donde el primer resultado es una matriz que contiene la presión en el tiempo, en todos los nodos. Lo que importa de este resultado, es el vector inicial de presiones base, dado por las presiones en todos los nodos en el tiempo 0. El segundo resultado es un número, y corresponde a la suma del caudal de fuga medido en cada nodo.
- (ii) Paso: Se modela la red para un paso de tiempo igual a 1 [h] y se extraen resultados. Se repite lo anterior hasta la hora final del tiempo de simulación, el cual para el presente trabajo se establece como 1 día. La función paso otorga recompensas cuando los settings sugeridos para cada válvula (los cuales se trabajan mediante controles) resultan en presiones mayores a 14 mca (presión requerida) en todos los nodos de la red. La recompensa se programa como se muestra en la Ecuación 3.8.

$$R = 100 \cdot \left| 1 - \frac{\sum_i^N \frac{P_{i,t_j}}{P_{i,h}}}{N} \right| \quad (3.8)$$

donde N es la cantidad de nodos de la red, P_{i,t_j} [mca] corresponde a la presión en el nodo i en el tiempo t_j y $P_{i,b}$ [mca] es la presión en el nodo i en hora h del escenario base, el cual incluye la red de distribución de agua con fugas y válvulas que no controlan aún la presión.

- (iii) Final: Tiempo final de la simulación. Se vuelve a los valores iniciales.

Es importante mencionar que el paso dentro del entorno funciona mediante la realización de una función de acción, cuyo objetivo es: dado un valor de presión de control propuesto para cada válvula por parte de la red neuronal, realizar el cambio de setting modelando la situación con controles y a la vez obtenga los resultados requeridos para que se pueda evaluar el desempeño

mediante las recompensas asignadas. La función paso utiliza a la función de acción para obtener los resultados de la modelación.

3.2.1.2. Modelación y funcionamiento de la red neuronal en entorno creado

Una vez se crea el entorno, se utiliza multiprocessing para agilizar el aprendizaje de la red. El modelo utilizado para realizar la optimización es el *Proximal Policy Optimization* (PPO), el cual fija la divergencia objetivo, δ . Este parámetro debe ser lo suficientemente grande para alterar sustancialmente la función que va de S a A en la Figura 2.9, pero lo suficientemente baja para que las actualizaciones sean estables. Es necesario recordar que S es el conjunto de todos los posibles estados y A es el conjunto de todas las posibles acciones que se pueden tomar por parte de la red neuronal. Luego de cada actualización, PPO chequea el tamaño de las actualizaciones. Si la divergencia excede al valor δ por más de 1,5, para la siguiente iteración se penaliza el parámetro doblando beta. Si las actualizaciones son pequeñas, se reduce beta a la mitad, expandiendo la región de confiabilidad. Otra ventaja de usar PPO es que resulta más simple implementarlo que el método de gradientes naturales y TRPO, pues no requiere resultados analíticos, o derivadas de segundo orden. El modelo TRPO (*Trust Region Policy Optimization*) es un tipo de algoritmo que actualiza las acciones con el paso necesario para aumentar las recompensas obtenidas, mientras se satisface una restricción sobre la cercanía entre la acción que se tomó en el paso anterior versus la acción que se tomó en el paso actual. Se puede utilizar para espacios continuos o discretos. El entrenamiento se realiza probando tasas de aprendizaje adecuadas, las cuales van desde 0.0003 a 0.000005. La duración del entrenamiento depende en este caso de la cantidad de válvulas, y se ejecuta hasta que se produce la convergencia. Una vez completado el entrenamiento, este se puede probar en la red, y el resultado serán valores sugeridos de apertura o presiones de control de forma horaria para cada válvula.

3.3. Algoritmo Genético

Se crea una población inicial correspondiente a los posibles valores de setting de cada válvula. Así, la población inicial corresponde a elecciones random entre valores de 14 y 50 mca. La evaluación de desempeño de la elección se realiza mediante la métrica mostrada en la Ecuación 3.9:

$$d = (n + 1) \cdot q_{it} \quad (3.9)$$

donde n es el porcentaje de nodos que cumple con la presión requerida (14mca) y q_{it} el caudal de fuga de la iteración [m^3/s].

Luego, la idea es minimizar este valor. Es decir, que no existan nodos que tengan presión bajo la requerida. Así, inicialmente se probarán las válvulas con los settings elegidos de forma random por parte del algoritmo genético, simulando para 24 hrs la red de distribución de agua y evaluando según el parámetro d . Los genes se pasarán de individuos padres a hijos para encontrar la mejor solución al problema, reduciendo el caudal de fuga a medida que pasan las iteraciones. Para realizar la tarea, se fija un número de iteraciones igual a 10, tamaño de la población igual a 10, un ratio de cruce= 0.9 y un ratio de mutación igual a 0.1.

4. APLICACIÓN SOBRE REDES EXPERIMENTALES

La metodología descrita anteriormente se empleará en dos redes experimentales cuyas características se presentan en la sección actual.

4.1. Red 1

La primera red experimental se muestra en la Figura 4.1, y se obtiene a partir de los datos mostrados en la Tabla 4.1. Se destaca que en la Figura 4.1, lo encerrado en celeste corresponde a una fuente.

Tabla 4.1. Parámetros red experimental 1.

Item	Valor	Unidad
Número de nodos	117	[-]
Número de tuberías	134	[-]
Longitud tuberías horizontales	99	[m]
Longitud tuberías verticales	80	[m]
Cantidad de fuentes	1	[-]
Pendiente	0.15	[-]

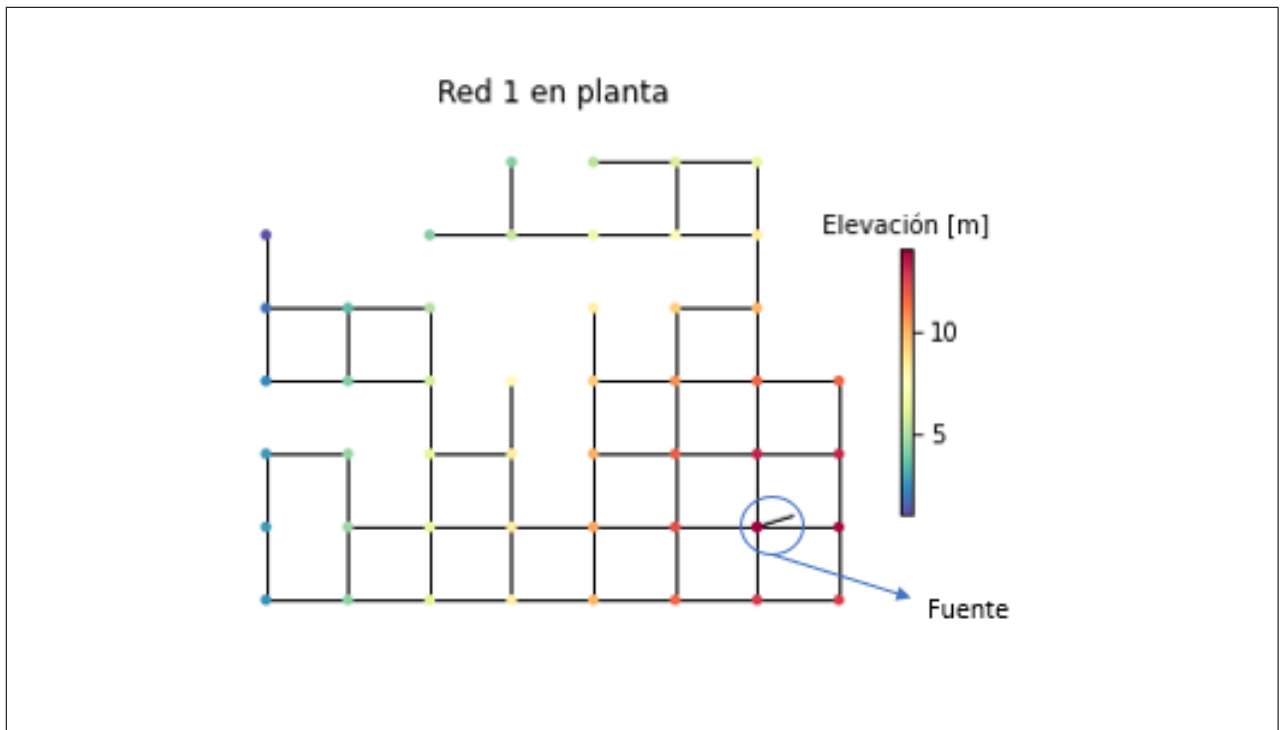


Figura 4.1. Red Experimental 1.

4.2. Red 2

La segunda red experimental se muestra en la Figura 4.2, y se obtiene a partir de los datos mostrados en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Parámetros red experimental 2.

Item	Valor	Unidad
Número de nodos	93	[-]
Número de tuberías	133	[-]
Longitud tuberías horizontales	100	[m]
Longitud tuberías verticales	80	[m]
Cantidad de fuentes	2	[-]
Pendiente	0.15	[-]

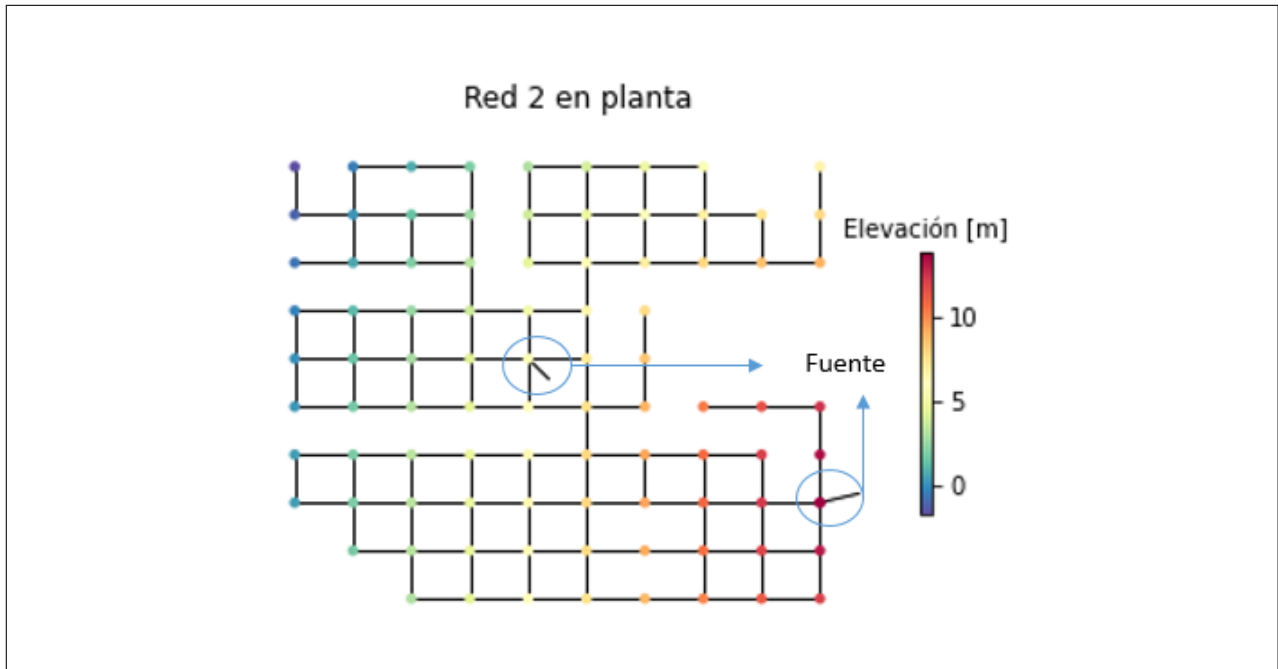


Figura 4.2. Red Experimental 2.

4.3. Demanda y demanda esperada

La demanda base se establece en ambas redes como 196 L/habitante/día según el informe anual del INE en el año 2021. Esto, junto a los patrones de demanda no constantes arbitrarios asumidos para la semana regular por parte de los consumidores, otorga para la red experimental 1 una demanda esperada de $0.0068 \text{ [m}^3/\text{s]}$ y para la red experimental 2 una demanda esperada de $0.0128 \text{ [m}^3/\text{s]}$.

5. RESULTADOS DE APLICACIÓN

5.1. Red experimental 1

5.1.1. Cálculo de influencias en red experimental y selección de válvulas según solapamiento

Para la primera red experimental, se presenta la Figura 5.1 con el objetivo de mostrar las influencias obtenidas para cada tubería, cuya metodología de cálculo se presentó en la sección de metodología. Las influencias acumuladas para cada tubería se presentan en la Tabla A.1 de la Sección Anexo, y en las Figuras A.1 y A.2 se muestra cómo varía la influencia en cada tubería cuando disminuye la presión de control.

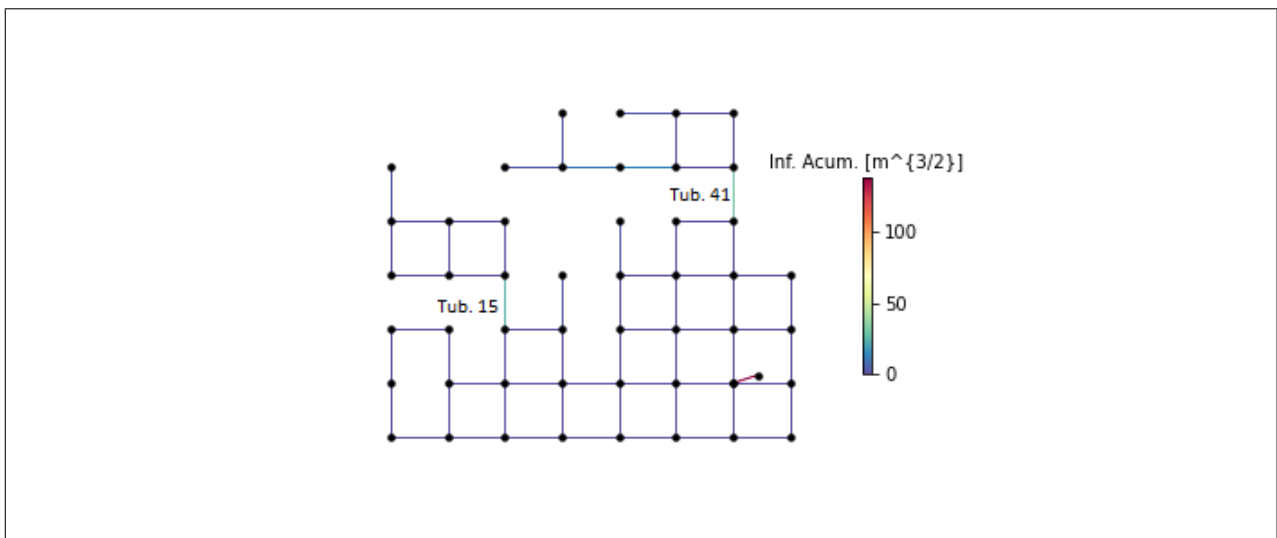


Figura 5.1. Influencias red experimental 1.

Es importante mencionar que aquellas tuberías que son puentes tienen influencia, la cual es pequeña. Que una tubería sea puente significa que si se elimina el elemento, parte de la red queda sin suministro.

5.1.2. Conformación escenario base

Se realiza la selección de válvulas candidatas. En la Figura 5.2, se muestran 4 casos de las posibles válvulas candidatas a añadir en la red de distribución. El criterio para determinar si son candidatas, se basa en el cálculo de influencias mencionado en la metodología, donde también se incluye el solapamiento según el parámetro porcentual de influencia marginal acumulada que tiene una válvula sobre otra. En a) queda sólo la válvula del reservorio, ya que no hay más válvulas que tengan una influencia marginal acumulada mayor al 80% de la del reservorio, en b) y c) quedan dos válvulas resultantes, la del reservorio y la de la tubería 15, y en d) quedan las 3 válvulas mostradas, donde la superior derecha es de la tubería 41. Finalmente, se dejarán las válvulas de la situación (c), pues la válvula del reservorio (inferior derecha) también podría controlar la zona superior derecha al tratarse de una red pequeña.

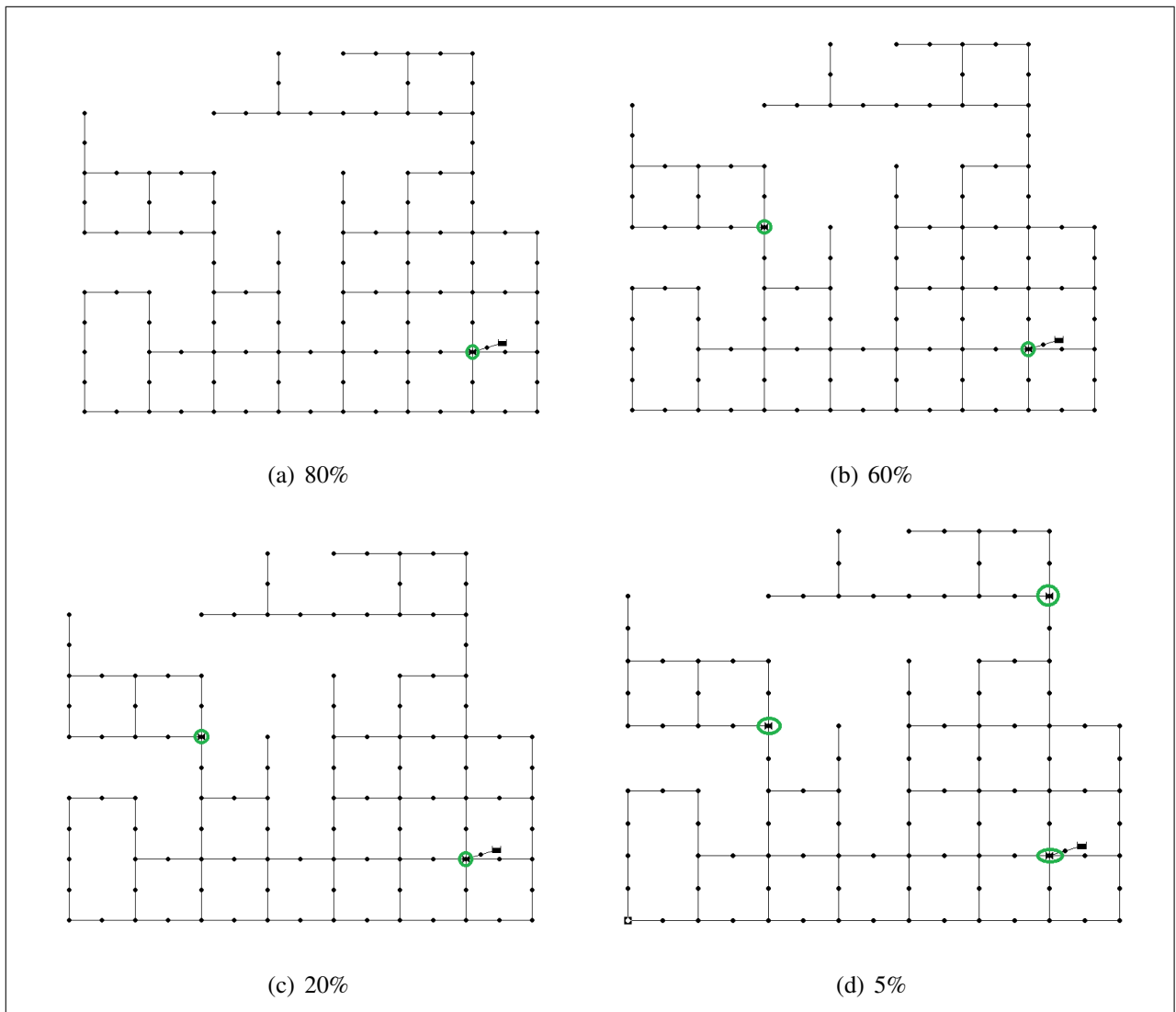


Figura 5.2. Selección de válvulas según comparación con válvula de mayor influencia.

Posterior a la selección de válvulas, corresponde agregarle fugas a la red experimental en todas sus tuberías, las cuales se modelan según la metodología descrita. Es posible apreciar dichas demandas de fuga en la Figura 5.3.

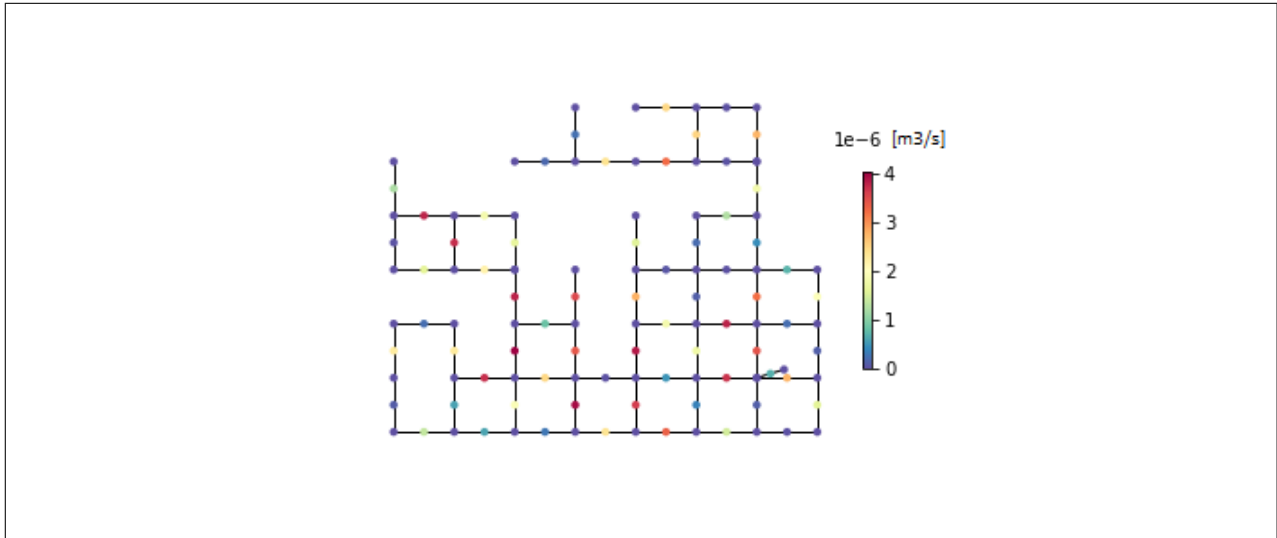


Figura 5.3. Caudal de fuga red experimental 1 en $[m^3/s]$.

El caudal de fuga total de la red (en las 24 horas) es de $0.0014 [m^3/s]$, lo que corresponde a aproximadamente el 20.5 % de la demanda esperada. Este valor está dentro del rango observado para redes reales.

5.1.3. Presiones escenario base

La Figura 5.4 muestra las presiones del escenario base, las cuales son consideradas como presiones iniciales y, por lo tanto, las presiones a optimizar. Es importante mencionar que no todas las presiones son igual a 60 mca, pero sí son cercanas a ese valor.

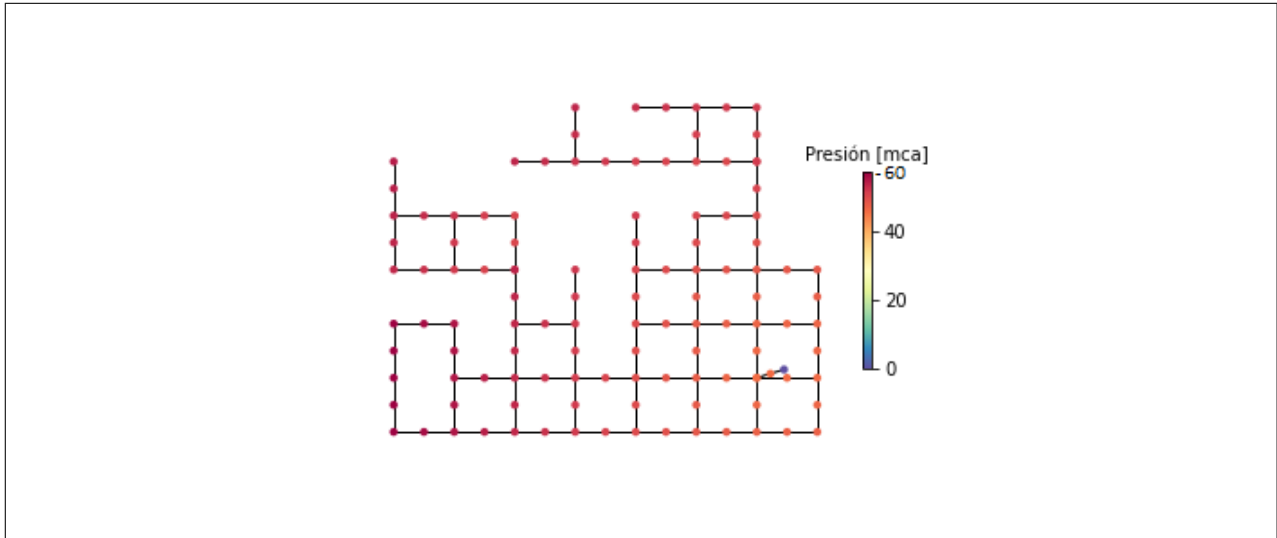


Figura 5.4. Presión en red experimental 1 en [mca].

5.1.4. Optimización de Presiones

5.1.4.1. Algoritmo Genético

Las condiciones de simulación se presentan en la Tabla 5.1. Recordando que se está trabajando con la situación (c) de la Figura 5.2, donde la válvula de la parte izquierda es la de la tubería 15 (valv pipe 15) y la válvula que se muestra en la parte inferior derecha es la del reservorio (valv pipe reservorio), los resultados del algoritmo genético se muestran en las Tablas 5.2 y 5.3 e incluyen la apertura de cada válvula y el caudal de fuga total, además de la métrica utilizada desarrollada en la Ecuación 3.9. Las presiones optimizadas se muestran en la Figura 5.5, y la convergencia del promedio de presiones en la red a medida que pasan las iteraciones se muestra en la Figura 5.6.

Tabla 5.1. Condiciones de simulación.

Parámetro	Cantidad	Unidad
Tiempo de simulación	24	[h]
Cantidad de válvulas	2	[-]

Tabla 5.2. Aperturas sugeridas para cada válvula.

Válvula	Setting [mca]
Valv pipe 15	25.436
Valv reservorio	15.224

Tabla 5.3. Resultados algoritmo genético.

Item	Valor	Unidad
Caudal de fuga	0.00092	m3/s
$(n + 1) \cdot Q$	0.0018	m3/s
Ahorro c/r pérdidas	34.2	[%]

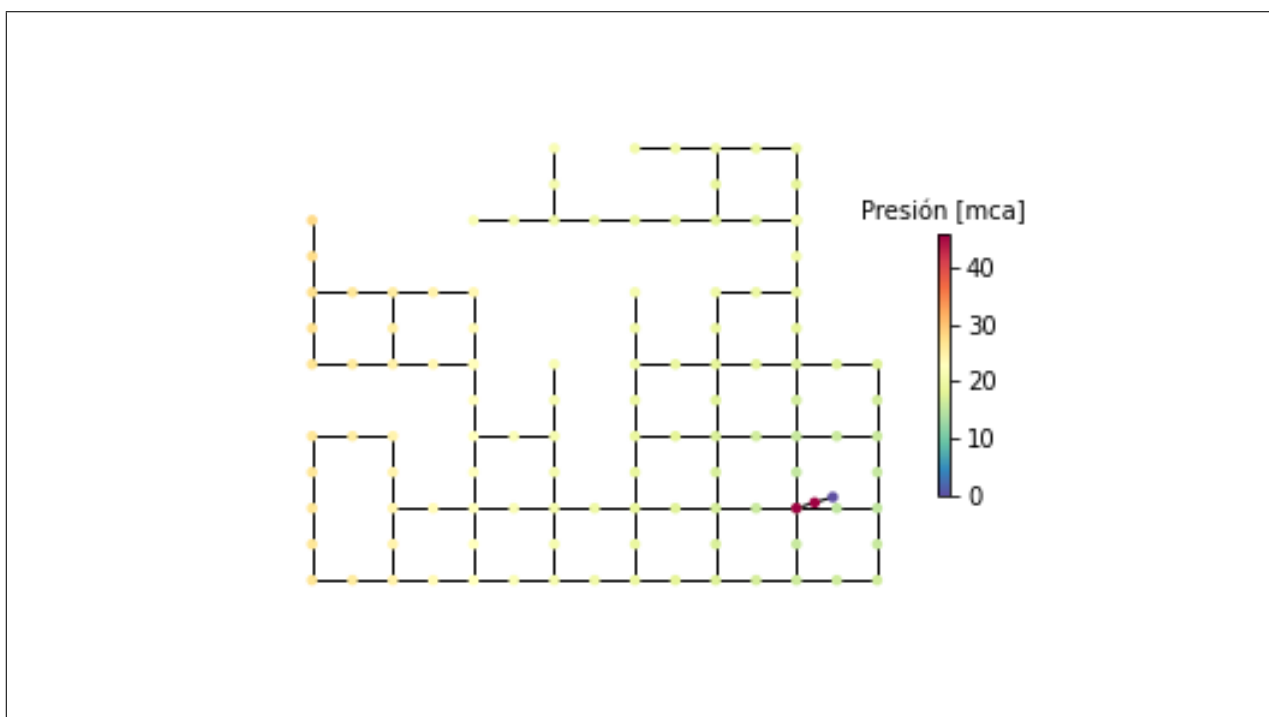


Figura 5.5. Presión optimizada en red experimental 1 en [mca].

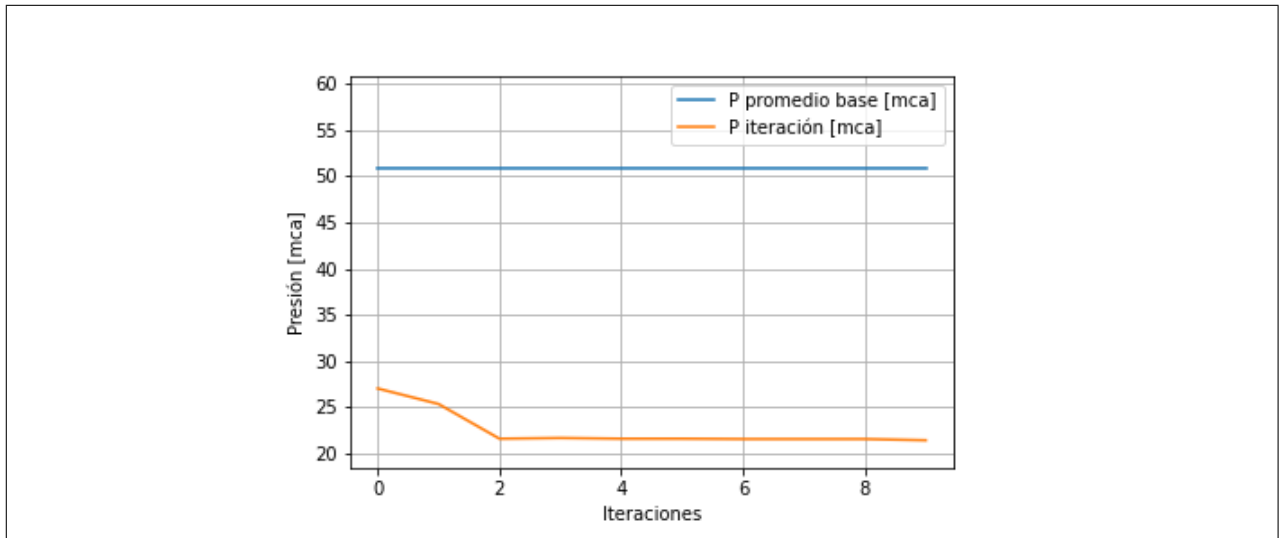


Figura 5.6. Convergencia de presión promedio en la red.

5.1.4.2. Red Neuronal

Los resultados de la red neuronal se presentan por hora para todo el tiempo de simulación en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Aperturas sugeridas para cada válvula de forma horaria y caudal de fuga respectivo.

Hr	$P_{Valvpipe15}$ [mca]	$P_{Valvreservorio}$ [mca]	Q_{fuga} [E-05 m3/s]
1	14.387	31.129	5.800
2	14.000	14.000	4.550
3	27.646	22.782	5.480
4	50.000	36.154	6.520
5	25.297	14.000	4.830
6	14.000	39.149	6.350
7	14.000	14.000	4.690
8	48.437	14.000	4.570
9	23.178	17.236	4.820

Tabla 5.4. Aperturas sugeridas para cada válvula de forma horaria y caudal de fuga respectivo.

Hr	$P_{Valvpipe15}$ [mca]	$P_{Valvreservorio}$ [mca]	Q_{fuga} [E-05 m3/s]
10	14.000	14.000	4.390
11	50.000	14.951	4.670
12	42.584	30.531	6.620
13	23.711	14.000	4.770
14	14.000	19.468	4.880
15	34.123	14.000	4.530
16	21.173	14.000	4.50
17	21.081	14.162	4.510
18	34.318	14.000	4.530
19	31.233	14.000	4.530
20	46.088	15.052	4.630
21	34.162	23.025	5.490
22	50.000	14.000	4.590
23	14.000	14.000	4.370
24	21.318	20.105	5.090

Lo anterior resulta en lo que se presenta en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Disminución porcentual de pérdidas.

Item	Valor	Unidad
Caudal de fuga	0.00119	m3/s
Ahorro c/r pérdidas	33.5	[%]

La convergencia de la recompensa por parte de la red neuronal y la variación de presión promedio se presentan en las Figuras 5.7 y 5.8, respectivamente.

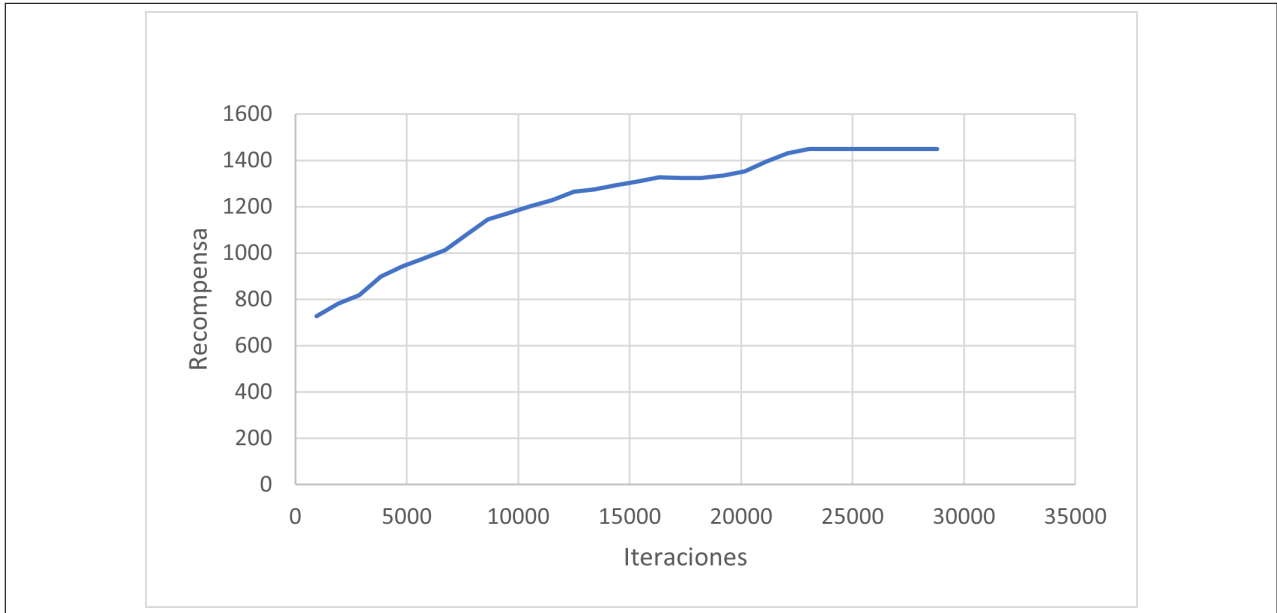


Figura 5.7. Convergencia de recompensa red neuronal.

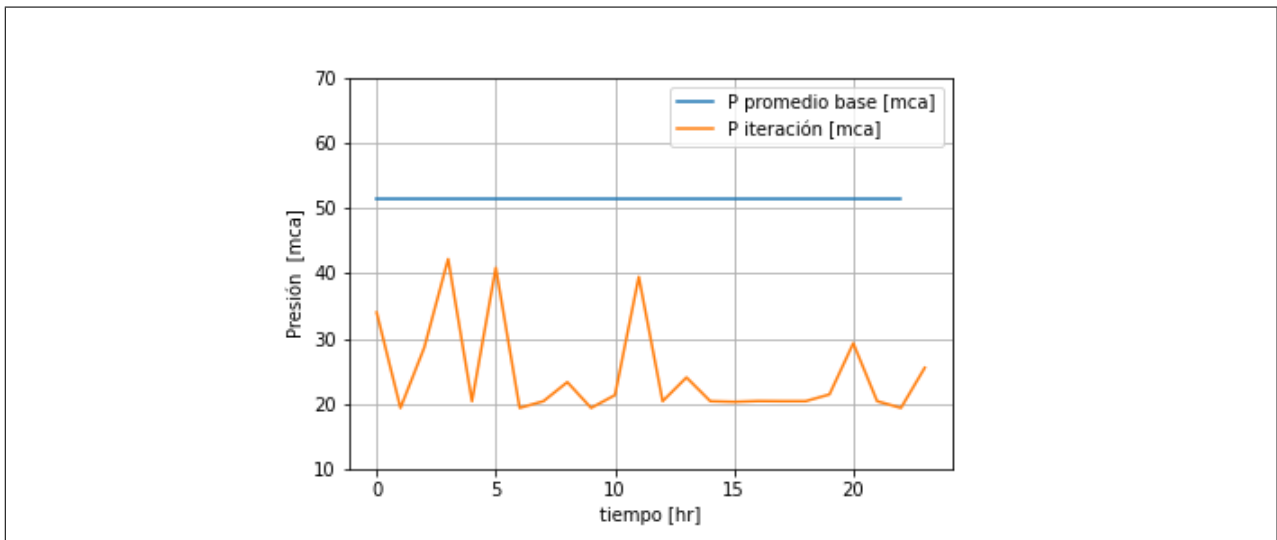


Figura 5.8. Presión promedio asociada a apertura de válvulas de forma horaria.

5.2. Red experimental 2

5.2.1. Cálculo de influencias en red experimental y selección de válvulas según solapamiento

Las influencias obtenidas para cada tubería de la segunda red experimental se presentan en la Figura 5.9. Las influencias acumuladas para cada tubería se presentan en la Tabla B.1 de la Sección Anexo, y en las Figuras B.1, B.2 y B.3 se muestra cómo varía la influencia en cada tubería cuando disminuye la presión de control.

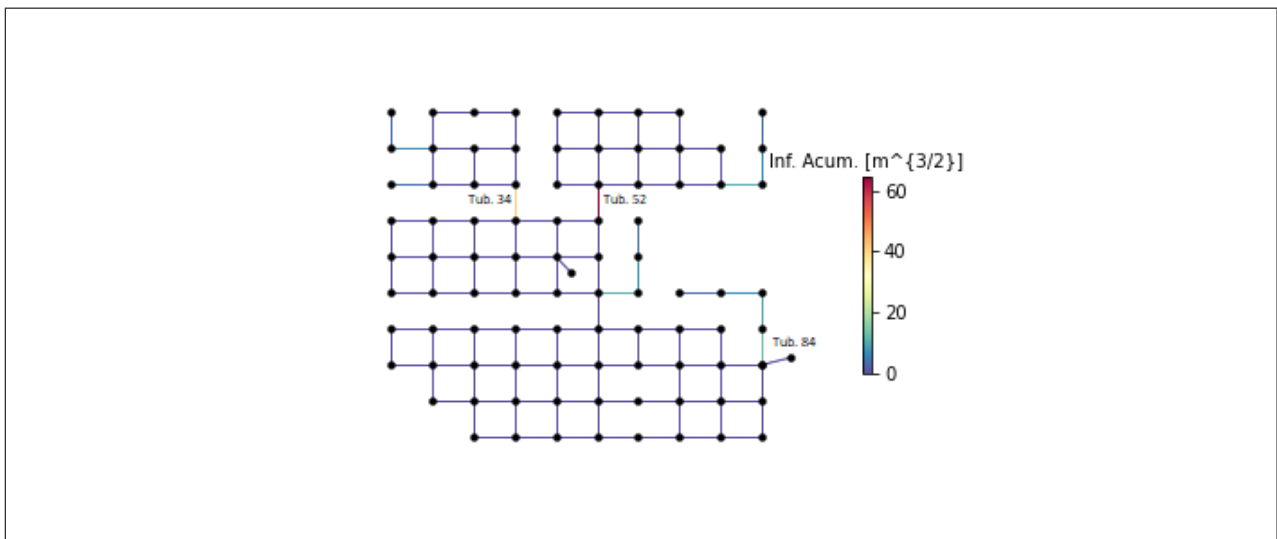


Figura 5.9. Influencias red experimental 2.

5.2.2. Conformación escenario base

En la Figura 5.10, se muestran las válvulas resultantes según comparación con influencia mayor. En a) y b) queda sólo la válvula de la tubería 52, ya que no hay más válvulas que tengan una influencia marginal acumulada mayor al 80% y 60% de la recién nombrada. En c) quedan las dos válvulas mostradas (válvula de la izquierda correspondiente a tubería 34), y en d) quedan tres válvulas resultantes, donde la que se encuentra más a la derecha corresponde a la tubería 84. Finalmente, se dejarán las válvulas de la situación (c), pues en la situación (d) la tercera válvula controla pocos nodos y en la práctica esto no se suele realizar.

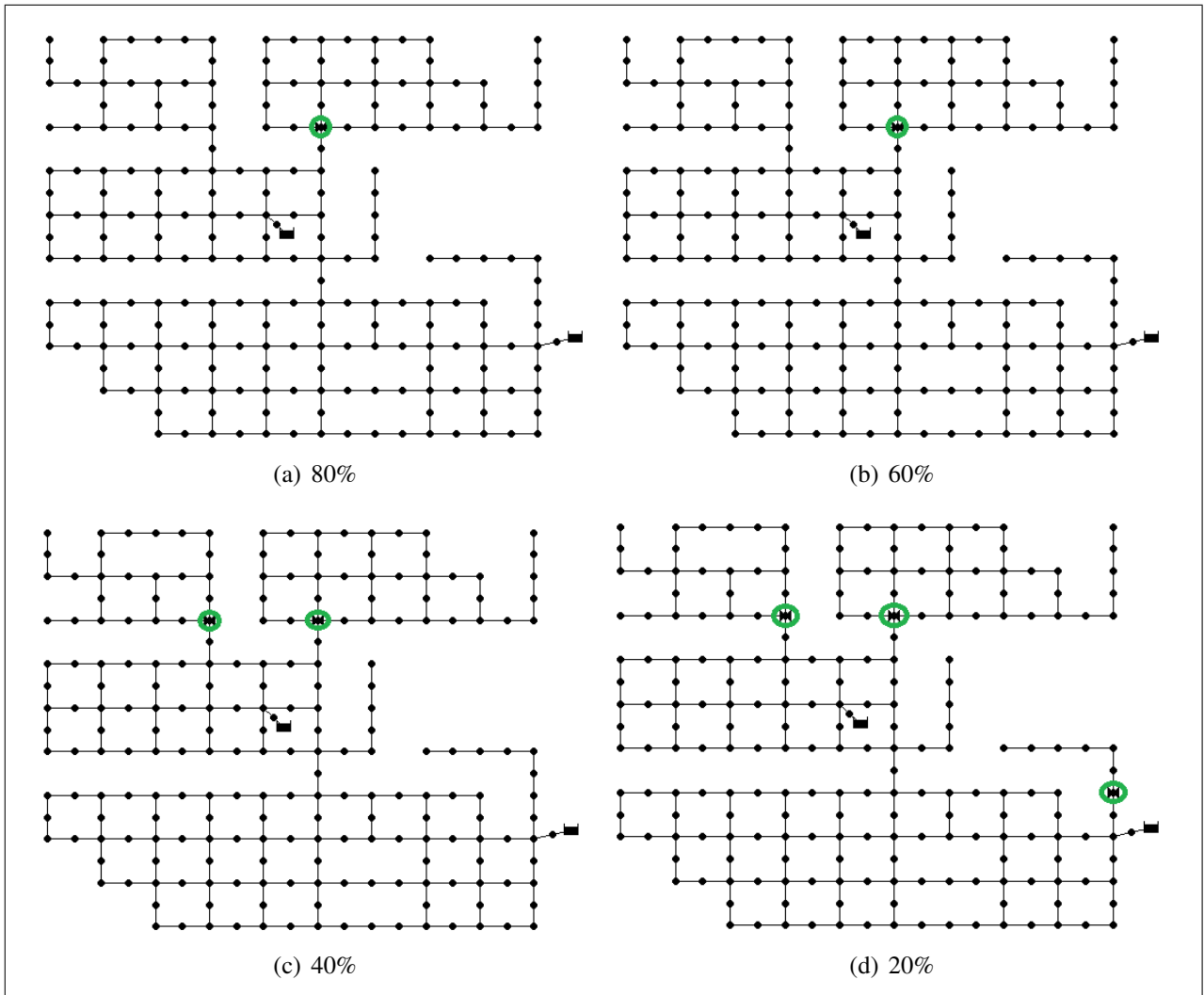


Figura 5.10. Selección de válvulas según comparación con válvula de mayor influencia.

Análogamente a la red anterior, corresponde añadir fugas a la red experimental. Esto se muestra en la Figura 5.11.

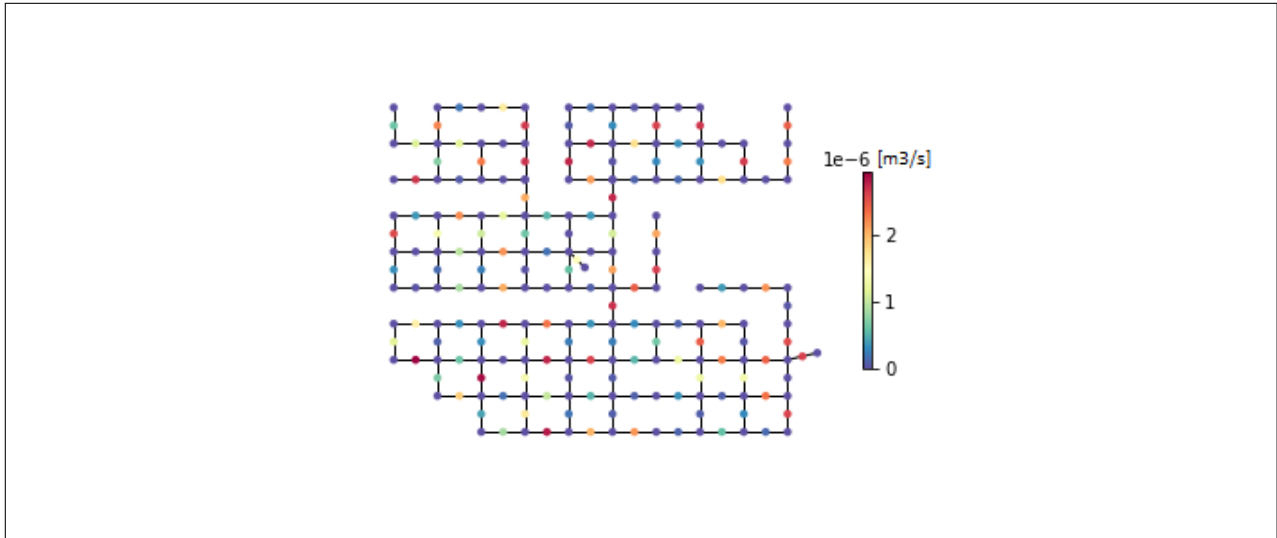


Figura 5.11. Caudal de fuga red experimental 2 en $[m^3/s]$.

El caudal de fuga total de la red (en las 24 horas) es de $0.0041 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que corresponde a aproximadamente el 35 % de la demanda esperada. Este valor está dentro del rango observado para redes reales.

5.2.3. Presiones escenario base

La Figura 5.12 muestra las presiones del escenario base, las cuales no son todas iguales a 60 mca, sino que varían en torno a ese valor.

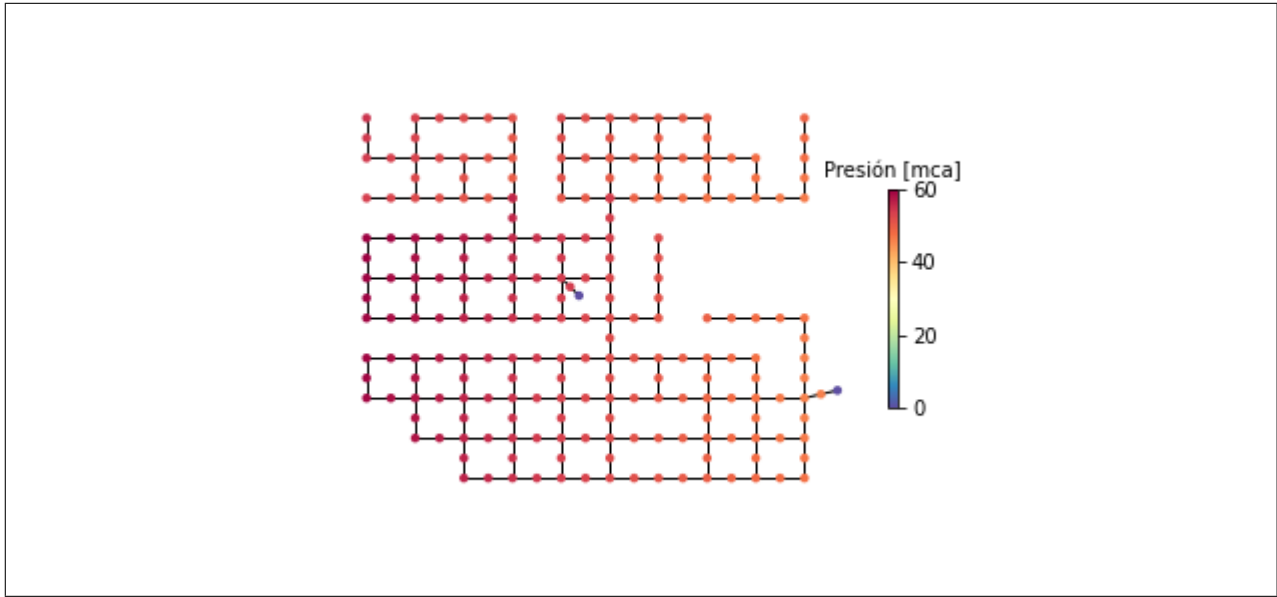


Figura 5.12. Presión en red experimental 2 en [mca].

5.2.4. Optimización de Presiones

5.2.4.1. Algoritmo Genético

Para la situación (c) de la Figura 5.10, el resultado por parte del algoritmo genético se muestra en las Tablas 5.6 y 5.7. Las presiones optimizadas se muestran en la Figura 5.13, y la convergencia del promedio de presiones en la red a medida que pasan las iteraciones se muestra en la Figura 5.14.

Tabla 5.6. Aperturas sugeridas para cada válvula.

Válvula	Setting [mca]
Valv pipe 52	20.524
Valv pipe 34	15.840

Tabla 5.7. Resultados algoritmo genético.

Item	Valor	Unidad
Caudal de fuga	0.0029	m ³ /s
$(n + 1) \cdot Q$	0.0087	m ³ /s
Ahorro c/r pérdidas	29.2	[%]

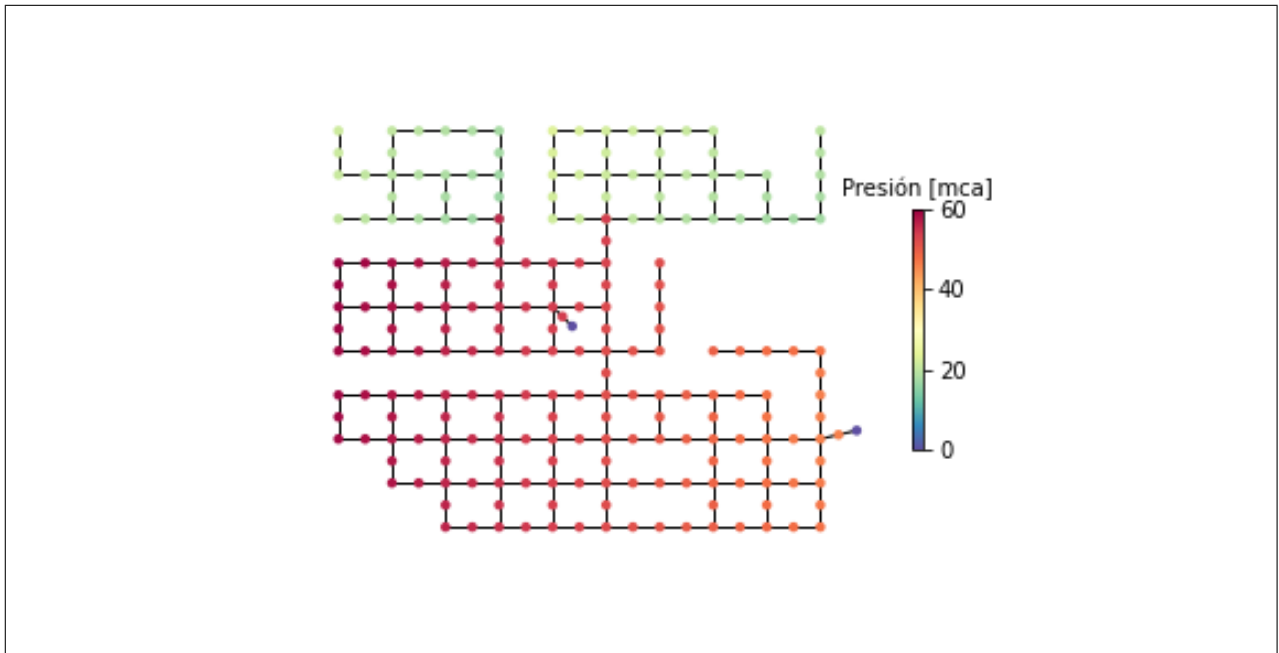


Figura 5.13. Presión optimizada en red experimental 2 en [mca].

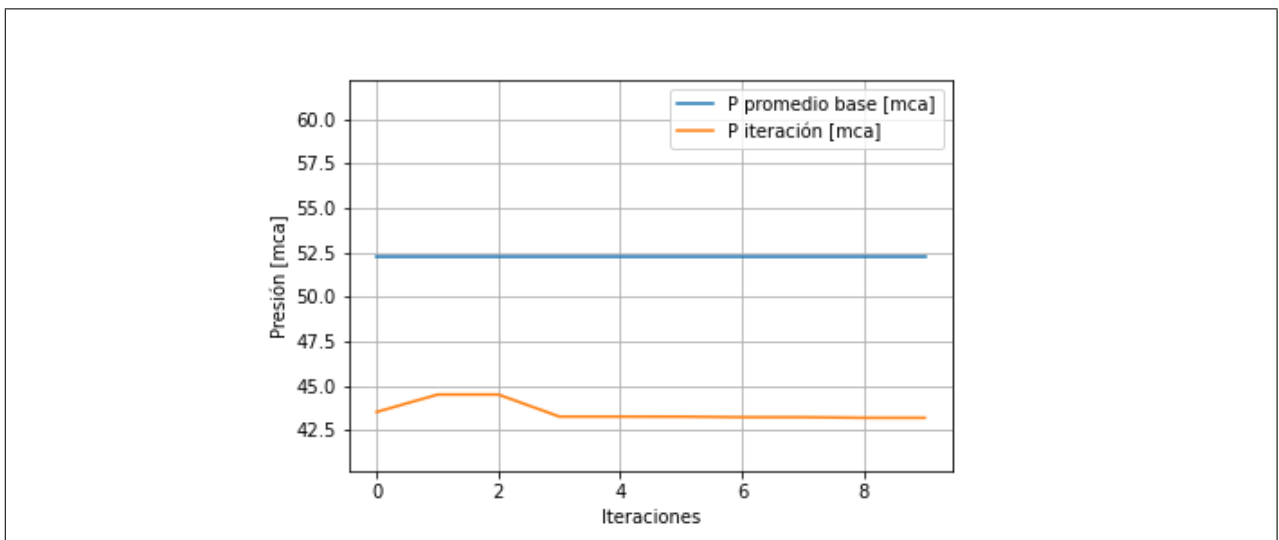


Figura 5.14. Convergencia de presión promedio en la red.

5.2.4.2. Red Neuronal

Los resultados de la red neuronal se presentan por hora para todo el tiempo de simulación en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8. Aperturas sugeridas para cada válvula de forma horaria y caudal de fuga respectivo.

Hr	$P_{Valvpipe52}$ [mca]	$P_{Valvpipe34}$ [mca]	Q_{fuga} [E-04 m ³ /s]
1	42.197	14.000	1.264
2	47.311	14.000	1.260
3	46.075	14.000	1.257
4	22.025	14.000	1.206
5	50.000	14.000	1.283
6	43.867	14.000	1.253
7	42.225	14.000	1.249
8	44.984	14.000	1.255
9	45.029	32.365	1.303
10	36.551	21.613	1.257
11	41.209	14.000	1.249
12	42.259	14.000	1.249
13	45.688	14.000	1.257
14	44.133	14.000	1.253
15	48.028	14.000	1.262
16	45.576	14.000	1.256
17	28.163	14.000	1.219
18	37.676	14.000	1.241
19	40.742	14.000	1.246
20	48.007	14.000	1.262
21	48.667	14.000	1.263
22	50.000	14.000	1.266
23	44.609	14.000	1.255
24	43.751	14.000	1.252

Lo anterior resulta en lo que se presenta en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9. Disminución porcentual de pérdidas.

Item	Valor	Unidad
Caudal de fuga	0.0030	m3/s
Ahorro c/r pérdidas	26.8	[%]

La convergencia de la recompensa por parte de la red neuronal y la variación de presión promedio se presentan en las Figuras 5.15 y 5.16, respectivamente.

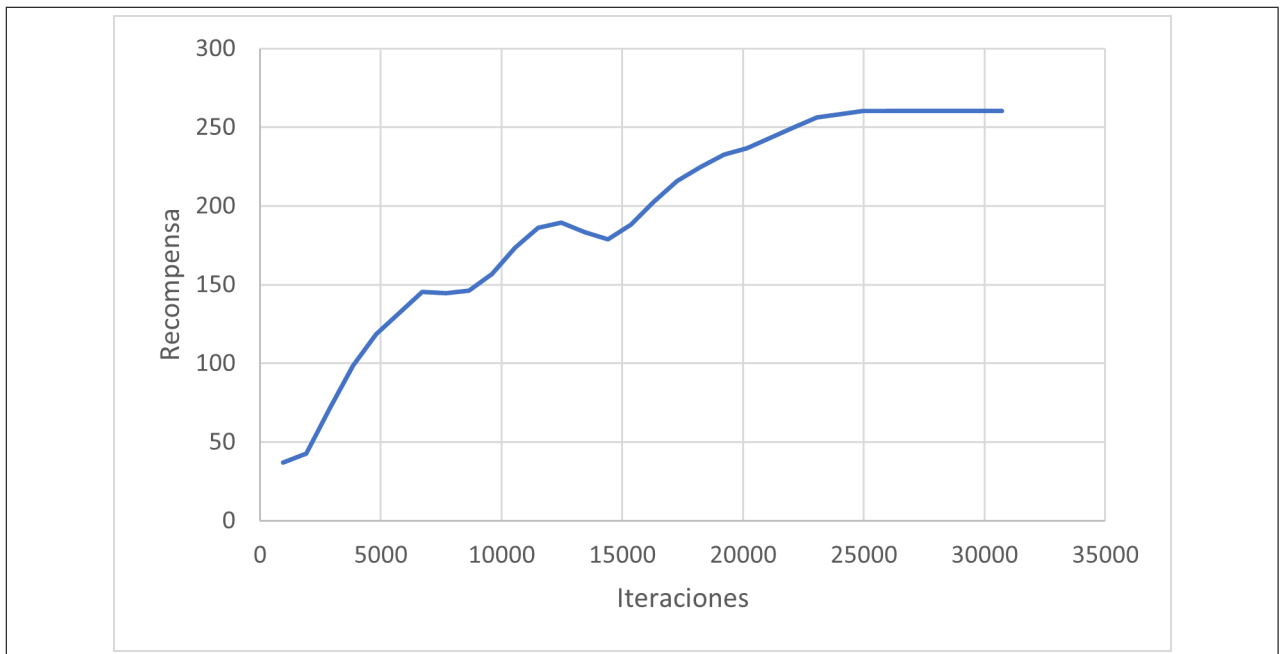


Figura 5.15. Convergencia de recompensa red neuronal.

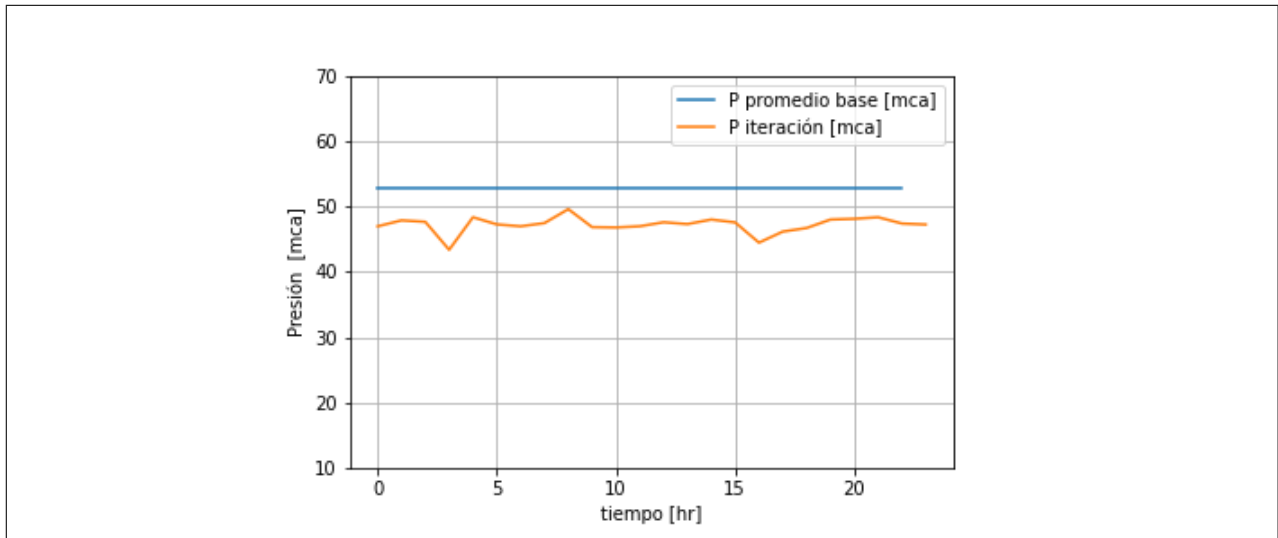


Figura 5.16. Presión promedio asociada a apertura de válvulas de forma horaria.

5.3. Control de nivel de estanques

La presente subsección tiene por objetivo presentar los resultados de añadir válvulas sobre los estanques, para simular control en nivel de estanques, ya que la válvula impone una presión en el nodo en que se la añade. Como se mencionó en la metodología de ajuste de apertura de válvulas, el análisis estará enfocado en la comparación de ambos métodos.

Cuando la válvula varía su presión de control, está imponiendo una presión sobre el nodo en el que está, por lo que si se añade sobre un estanque, la presión de aquel nodo será la que tenga la válvula, es decir, su presión de control.

Para la red experimental 1, el algoritmo de localización sugirió que la válvula debería añadirse en el estanque para optimizar la presión, pero para la red experimental 2 no fue así.

A continuación, se presentan los resultados de añadir la válvula en los estanques en la segunda red experimental estudiada:

5.3.0.1. Válvula añadida sobre estanques en red experimental 2.

Se trabaja sobre la situación de la Figura 5.17

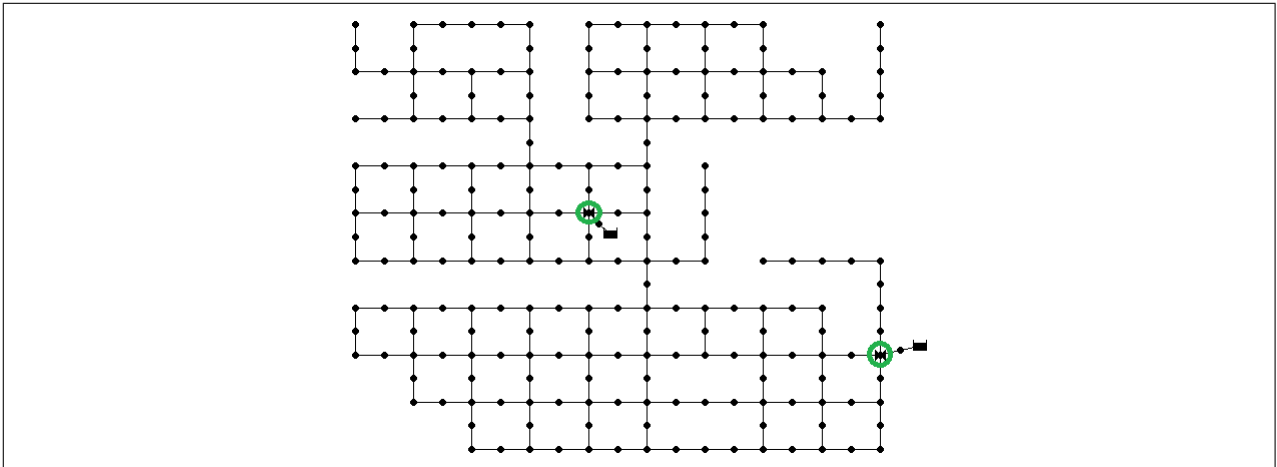


Figura 5.17. Válvulas añadidas de forma manual en la segunda red experimental.

- (i) Algoritmo Genético: Para la situación de la Figura 5.17, el resultado por parte del algoritmo genético se muestra en las Tablas 5.10 y 5.11. Las presiones optimizadas se muestran en la Figura 5.18, y la convergencia del promedio de presiones en la red a medida que pasan las iteraciones se muestra en la Figura 5.19.

Tabla 5.10. Aperturas sugeridas para cada válvula.

Válvula	Setting [mca]
Valv pipe reservorio 1	25.648
Valv pipe reservorio 2	15.86

Tabla 5.11. Resultados algoritmo genético.

Item	Valor	Unidad
Caudal de fuga	0.002464	m ³ /s
$(n + 1) * Q$	0.0073	m ³ /s
Ahorro c/r pérdidas	41.4	[%]

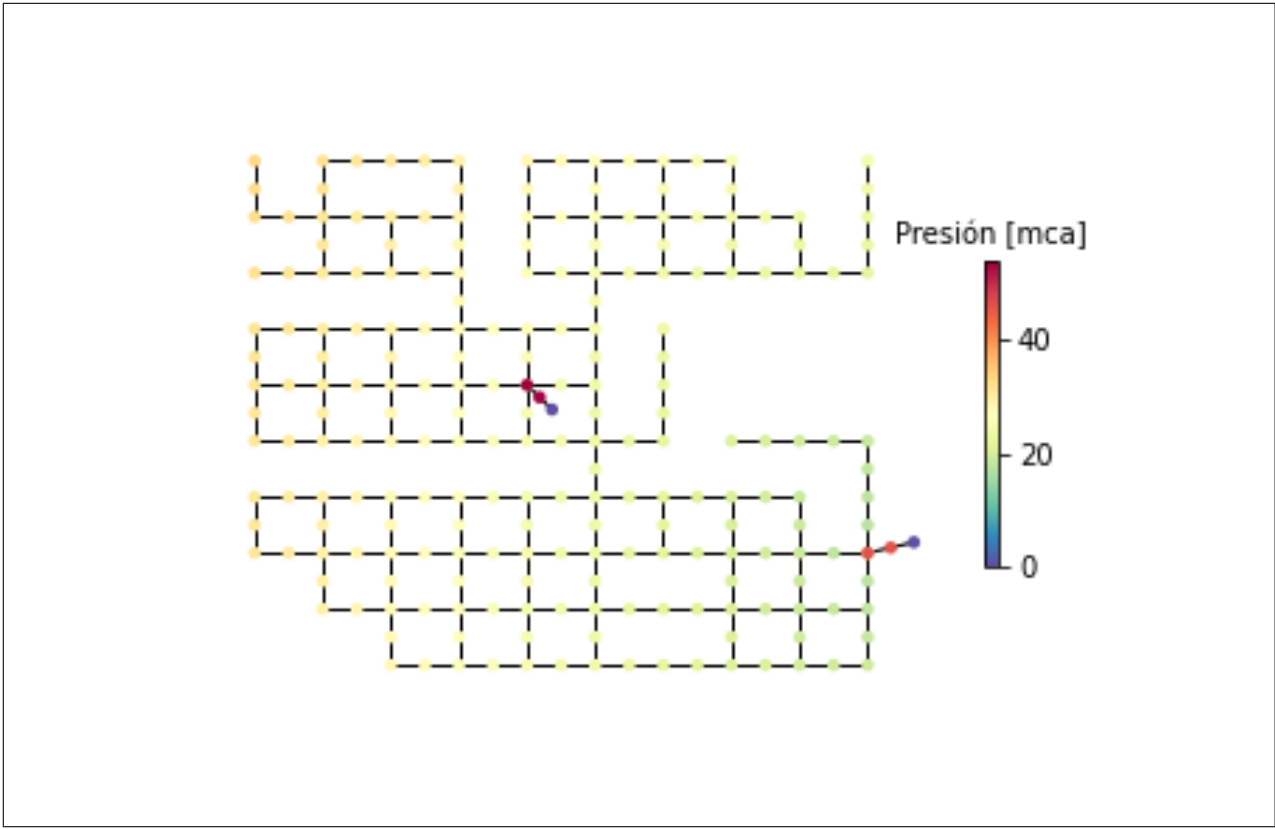


Figura 5.18. Presión optimizada en red experimental 2 en [mca].

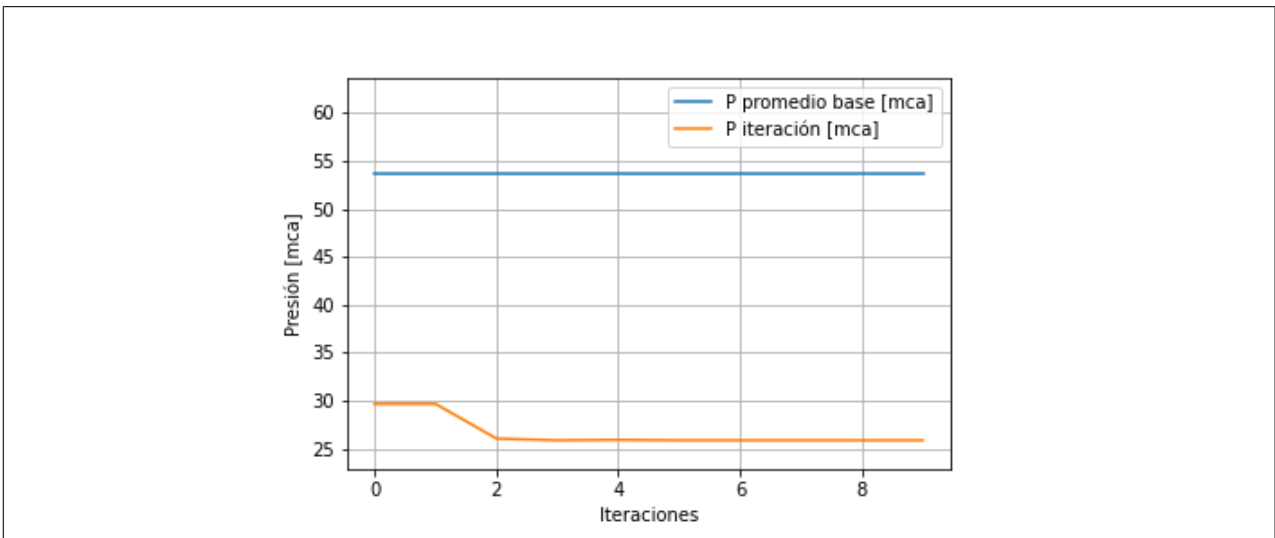


Figura 5.19. Convergencia de presión promedio en la red.

- (ii) Red neuronal: Se presentan resultados de aplicación sobre configuración de Figura 5.17. Los resultados de la red neuronal se presentan por hora para todo el tiempo de simulación en la Tabla 5.12.

Tabla 5.12. Aperturas sugeridas para cada válvula de forma horaria y caudal de fuga respectivo.

Hr	Valv reservorio 1	Valv reservorio 2	Q_{Fuga} [E-04 m ³ /s]
1	34.504	14.000	1.050
2	14.000	14.000	0.810
3	28.491	27.316	1.060
4	14.000	14.000	0.830
5	28.771	14.000	0.930
6	14.000	20.119	0.970
7	14.000	16.890	0.860
8	14.000	23.311	0.970
9	17.402	20.671	0.930
10	14.000	16.975	0.870
11	39.405	30.911	1.090
12	25.280	16.452	0.890
13	18.198	14.000	0.810
14	14.000	14.000	0.810
15	14.000	14.000	0.810
16	17.307	14.000	0.810
17	34.126	14.000	1.040
18	19.326	14.000	0.810
19	14.000	25.932	1.040
20	14.000	14.000	0.830
21	29.6.000	14.000	0.940

Tabla 5.12. Aperturas sugeridas para cada válvula de forma horaria y caudal de fuga respectivo.

Hr	Valv reservorio 1	Valv reservorio 2	Q_{Fuga} [E-04 m3/s]
22	49.367	14.000	1.260
23	33.283	14.000	1.020
24	24.981	14.000	0.870

Lo anterior resulta en lo que se presenta en la Tabla 5.13.

Tabla 5.13. Disminución porcentual de pérdidas.

Item	Valor	Unidad
Caudal de fuga	0.0022	m3/s
Ahorro c/r pérdidas	46.3	[%]

La convergencia de la recompensa por parte de la red neuronal y la variación de presión promedio se presentan en las Figuras 5.20 y 5.21, respectivamente.

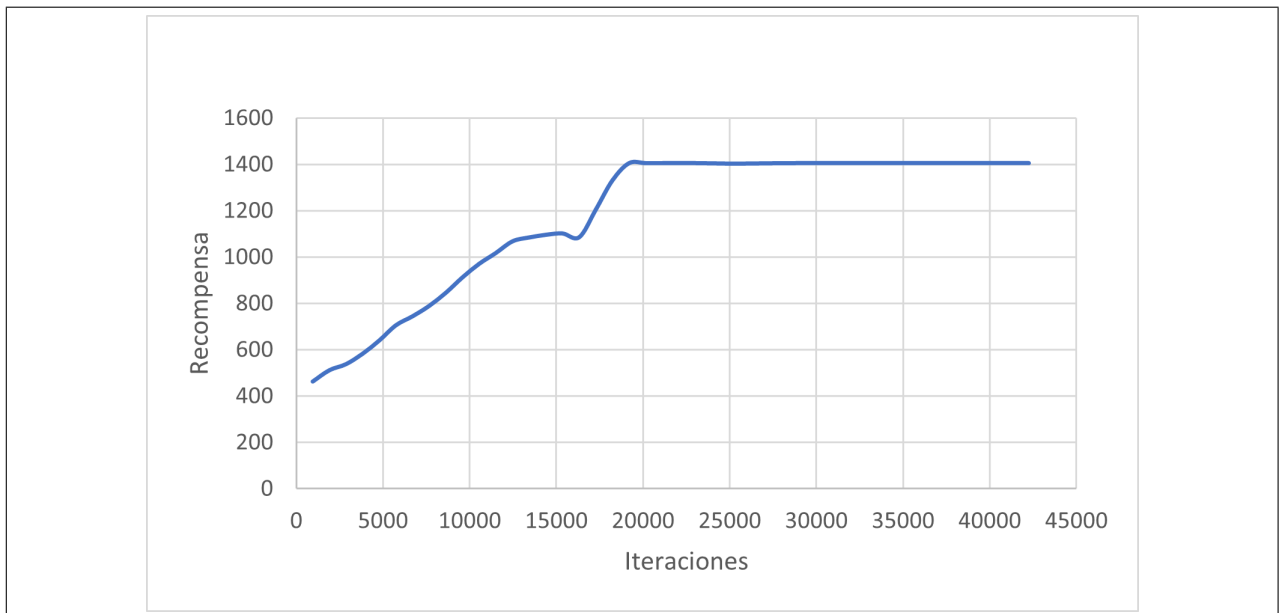


Figura 5.20. Convergencia de recompensa red neuronal.

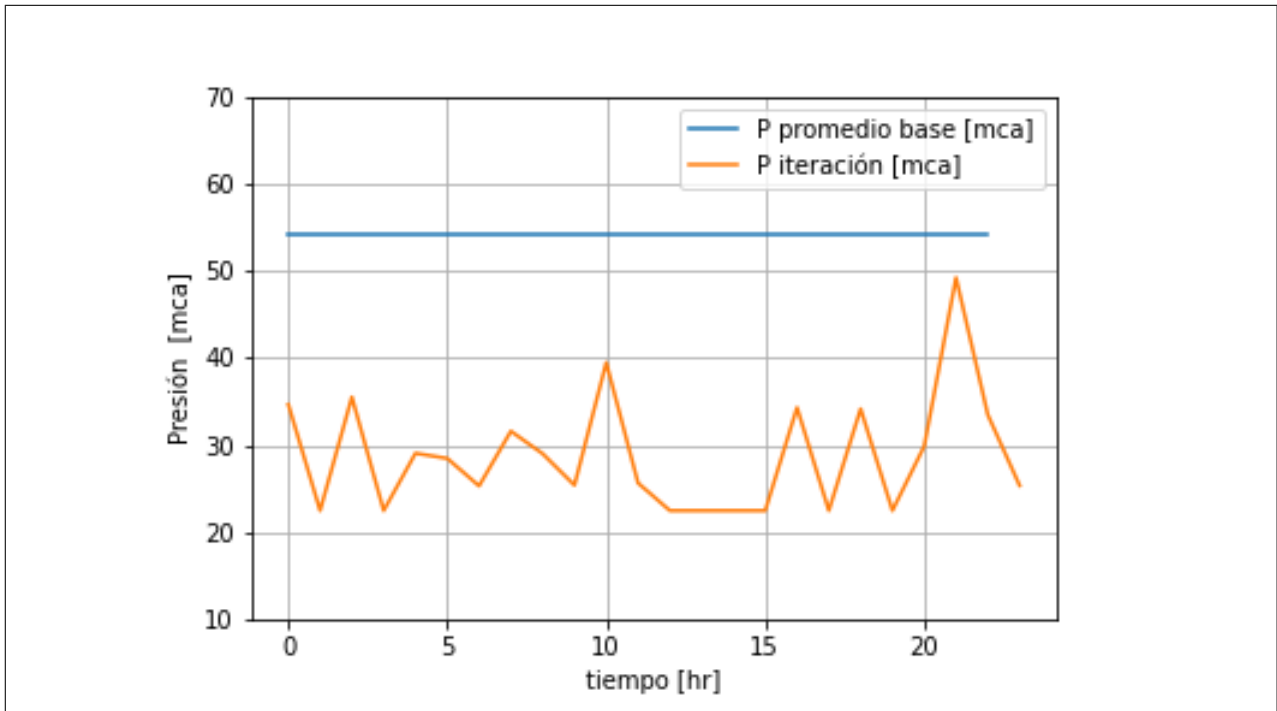


Figura 5.21. Presión promedio asociada a apertura de válvulas de forma horaria.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar, es importante tener en cuenta que el método de localización de válvulas según la sensibilidad ante el cambio de presión en todos los nodos de la red de distribución no es siempre el óptimo para controlar la presión en la misma, especialmente cuando se aplica el método en redes de distribución con más de un estanque. Lo anterior se demuestra para la red experimental 2, donde las influencias para las tuberías de los reservorios son 0 al existir suministro de forma excluyente e independiente de cada reservorio (si se corta el suministro de un reservorio, el otro reservorio existente abastecerá a los nodos de la red). Así, la aplicación del algoritmo genético para la situación (c) de la Figura 5.10 resulta en un control de sólo un sector de la red, aguas abajo de las válvulas añadidas, lo que se puede observar en la Figura 5.13. El control en de nivel de estanques, por su parte, permite controlar de mejor forma la presión en la red experimental 2. Como se muestra en la Figura 5.18, cuando se trabaja añadiendo válvulas en ambos reservorios de la red (situación mostrada en la Figura 5.17), éstas son capaces de controlar la presión en toda la red de distribución. Lo anterior se puede corroborar de forma más clara comparando el ahorro de pérdidas de ambas situaciones, donde para el contexto (c) de la Figura 5.10 se obtiene un ahorro de un 29% con respecto a las pérdidas (Tabla 5.7, mientras que para la situación de la Figura 5.17, se obtiene un ahorro de un 41% con respecto a las pérdidas (Tabla 5.11). Aún así, que el método de control de estanques tenga mejor desempeño que el método de localización propuesto en la red experimental 2 no quiere decir que es mejor, pues, el impacto del método de localización de válvulas depende de la redundancia de la red que se esté analizando. Por otra parte, el método de localización de válvulas brinda la posibilidad de analizar sectorialmente la red, comparando presiones base y resultantes de aplicar el modelo.

Con respecto a la curva de influencias para cada tubería (Sección Anexo), es necesario mencionar que siguen una forma determinada por la Ecuación 3.6, pero que también viene dada por la cantidad de presiones de control tomadas en cuenta para el presente trabajo (30). Si se tomaran menos valores, los resultados se traducirían en una recta, y si se tomaran más, los resultados se

mostrarían de una forma más curva. Aún así, se corrobora el comportamiento de la influencia, pues, cuando disminuye la presión de control en la válvula, la influencia decrece, ya que se controla menos la presión en la red. Se destaca entonces la importancia de tomar una cantidad certera de presiones de control para realizar el análisis, ya que si se tomaran pocas presiones de control, la conclusión sería que la influencia decrece de forma lineal a medida que se controla menos, pero en las Figuras A.1, A.2, B.1, B.2 y B.3 no se tiene un comportamiento lineal, ya que se tomó una cantidad de presiones de control suficiente para obtener un resultado acertado.

Es necesario tener en cuenta que el valor de una válvula reguladora de presión es significativo, y que estos elementos son pocos en Chile. Actualmente, una válvula de control automático ZUR WILKINS es de USD 3,600. Sin embargo, es importante considerar que un ahorro de un 30-40% de agua en la red de agua potable de forma diaria es una inversión importante no sólo desde el punto de vista económico, sino también ambiental. Al trabajar disminuyendo las presiones en la red, el algoritmo es capaz no sólo de disminuir las pérdidas de agua en la red, sino que también es capaz de cuidar la durabilidad de las tuberías. Dado el panorama actual, se requieren metodologías que automaticen procesos para minimizar errores y pérdidas dentro de la red, y conforme pasa el tiempo, es probable que este tipo de soluciones sí sea una alternativa prácticamente aplicable.

Por otra parte, es necesario también mencionar la importancia del parámetro límite de influencias marginales acumuladas, el cual actúa como un segundo y último filtro de selección de válvulas de la red de distribución. Este parámetro se refiere a la razón porcentual de influencia marginal acumulada de la válvula que se está estudiando añadir v/s la válvula de mayor influencia marginal acumulada ya añadida, por lo que su trabajo es seleccionar aquellas válvulas importantes resultantes una vez realizado el estudio del solapamiento. Si no se realizara el estudio del solapamiento, las válvulas resultantes quedarían en cada tubería que sea puente dentro de la red, y no se aseguraría un desempeño correcto de las mismas, quedando válvulas redundantes dentro de la red de distribución. En relación a lo mencionado anteriormente, se observa que el desempeño de ambos métodos de inteligencia artificial (algoritmo genético y red neuronal) también sugiere las válvulas

que son redundantes dentro de la selección, resultando aperturas que no controlan para las mismas, lo cual complementa al análisis del solapamiento.

El funcionamiento de ambos algoritmos difiere de forma significativa. Mientras que el algoritmo genético obtiene resultados para todo el tiempo de simulación (24 hrs para el presente trabajo), la red neuronal obtiene resultados de forma horaria para la apertura de las válvulas. Esto es una diferencia fundamental al momento de programar el funcionamiento de ambos métodos, pues para el primero es necesario trabajar con el setting de la válvula directamente mientras que el segundo método trabaja con la apertura de las válvulas mediante controles.

Para determinar la factibilidad de aplicación del método con algoritmo genético o red neuronal, es necesario considerar el funcionamiento de una PRV. Teniendo en cuenta la información de la Sección 2.4.1, en la práctica ajustar la apertura de la válvula consiste en ajustar un tornillo, y esto implica modificar la presión en el flujo. Un riesgo directo de ajustar recurrentemente las válvulas es que disminuye su vida útil. Además, como las válvulas se deben cerrar por la noche, el método de algoritmo genético pasa a ser más práctico, pues requiere ajustar la válvula sólo una vez al día.

En cuanto a los tiempos de cómputo de ambos algoritmos, para el algoritmo genético la convergencia se tiene en cuestión de 7 minutos para la red experimental 2, y es dependiente, dentro otros parámetros, de la cantidad de iteraciones con las que se trabaje. Para la red neuronal, la convergencia se asegura en cuestión de horas (5 horas para la segunda red experimental). El qué tan rápido aprende la red neuronal se define en la calibración de los parámetros descritos en la metodología, pero también en la forma en la que quedan establecidas las recompensas. Estas últimas deben ser un indicador representativo de la acción tomada y no un valor constante, de modo que la red neuronal sepa que, ejecutada una acción, esta es mejor o peor que la anterior. Para el presente trabajo, la recompensa se asigna de acuerdo a la Ecuación 3.8, donde se compara la presión del nodo i en el tiempo t con la presión del nodo i en el tiempo t del escenario base. Luego, se obtiene el promedio de la comparación en todos los nodos para el tiempo t . Luego, una recompensa igual a y , significa

que en promedio, las presiones bajaron un y % con respecto del escenario base. Dado lo anterior, es posible apreciar recompensas más altas en redes cuyas válvulas se añaden en los reservorios, ya que en tal situación se controlan las presiones en toda la red, mientras que para redes cuyas válvulas no se añaden en los reservorios se controla en sólo un sector, por lo que la diferencia de presiones con respecto al escenario base no será tan significativa como en el escenario antes mencionado. Este método se desarrolló y aplicó en un computador personal, y las redes de estudio son simples, pero en redes más complejas, el algoritmo tenderá a tomar más tiempo en el análisis, dada la cantidad de simulaciones necesarias para realizar el estudio. Lo anterior puede considerarse como una limitación de la metodología. Es importante mencionar que el aprendizaje de la red neuronal no pasa por el tamaño de la red sino que por la cantidad de válvulas analizadas. Esta se demorará más en converger a medida que aumente la cantidad de válvulas estudiadas.

La factibilidad de aplicabilidad del método de localización de válvulas en redes más grandes depende de la redundancia de la red, y el tiempo de cómputo para determinar influencias irá aumentando mientras más nodos se tengan, puesto que el método añade la válvula nodo por nodo y extrae parámetros de estudio. Si una red de distribución de agua es redundante, existe suministro alternativo para algunos nodos, y esto influye de manera directa en la influencia de la válvula ejercida en la red. Sin embargo, se implementaron mejoras en la metodología de ajuste de apertura de la válvula, ya que para la red neuronal se trabajó con multiprocesador, y el entorno de la misma fue creado apuntando a que la red aprenda de forma más sencilla.

7. CONCLUSIONES

Se determina que la métrica de influencias desarrollada en el presente trabajo es un parámetro representativo de la sensibilidad de los nodos ante el cambio de presión cuando se añade una válvula en algún sector de la red, mostrando resultados coherentes con la identificación de puentes en la misma, así como también, mostrando un comportamiento lógico cuando el valor de la presión de control de la válvula estudiada va decreciendo (menor influencia cuando se controla menos). Sin embargo, cuando la red analizada tiene más de un reservorio, la métrica ignora la importancia de la fuente, y en consecuencia, la influencia asociada a la tubería del elemento es igual a 0, producto del suministro continuo que existiría si se cortara el abastecimiento desde uno de los reservorios. Matemáticamente, esto es correcto, pero desde el punto de vista ingenieril, el resultado final es mejor si se consideran las tuberías de los reservorios como elementos que deberían llevar válvulas para controlar las presiones en toda la red. Es aquí cuando la aplicabilidad del método de localización de válvulas entra en discusión, ya que ofrece un análisis más sectorial de la red. La mejora viene dada por el complemento que existe entre la metodología de localización y la de control de nivel de estanques.

Por otra parte, el desempeño del algoritmo genético y la red neuronal es similar, obteniendo ahorros sobre el 26 % de las pérdidas para ambas redes, para los escenarios seleccionados. En particular, para la primera red experimental, el algoritmo genético logra una mayor disminución del caudal de fugas, obteniendo un 34.2 % de ahorro (con respecto a pérdidas), mientras que la red neuronal obtiene un 33.5% de ahorro. Para la segunda red, el método de localización sugiere un ahorro de un 29.2 % con el algoritmo genético, y la red neuronal logra un ahorro de un 26.8%. El método de control de nivel de estanques brinda resultados más significativos: el algoritmo genético logra un ahorro de 41.4% de pérdidas y la red neuronal un 46.3%. El costo de las válvulas está dentro de un rango de 3000-4000 dólares aproximadamente, aunque depende de la válvula. A largo plazo, la válvula reguladora de presión permitirá ahorrar agua y también cuidar la vida útil de las tuberías, por lo tanto es una inversión considerable.

Lo anterior, permite relacionar el grado de control en la red con la posición de las válvulas seleccionadas, ya que para la primera red, al tener solo un reservorio, se controla menos que para una red que tiene más reservorios y posibles localizaciones de válvulas.

Además, se logra generar un programa que captura de forma correcta el funcionamiento de la red al ir analizando cada tubería de la misma para un número determinado de presiones de control para cada válvula, lo que se traduce en un estudio completo de la sensibilidad de los nodos ante distintos cambios en la presión. Así, la métrica de la influencia resulta ser representativa de lo que está pasando en la red, y por lo tanto, obtener una buena primera aproximación de tuberías candidatas a llevar válvula. Luego de la obtención de la primera lista de tuberías candidatas, se realiza un análisis de solapamiento de válvulas candidatas de modo que no queden válvulas redundantes. De esta forma, se obtiene una metodología que puede aportar desde múltiples áreas a la ingeniería civil. Particularmente desde el área de la hidráulica, la metodología es capaz de reducir las pérdidas dentro de la red añadiendo válvulas reguladoras de presión luego de realizar el análisis mencionado a lo largo del presente trabajo, así como también lograr conservar de mejor forma los elementos de la red, puesto que las altas presiones también pueden ocasionar daños a las tuberías. Si bien el cambio estructural que implica el añadir una PRV puede llegar a ser significativo, el método representa una forma de gestionar frecuentemente las redes en la red, permitiendo un control de presiones constante sobre la misma.

Finalmente, se espera que la metodología propuesta se emplee en la etapa de generación del modelo hidráulico de las redes de distribución con el fin de identificar en una fase previa los elementos que tendrían que llevar válvula para así controlar la presión en la red, y también para cuidar los elementos desde un principio. Esto con el fin de evitar la práctica de poner válvulas en redes ya puestas en marcha en sectores donde simplemente la presión es alta.

BIBLIOGRAFÍA

- Adedeji, K. B., Hamam, Y., Abe, B. T., & Abu-Mahfouz, A. M. (2018). Pressure management strategies for water loss reduction in large-scale water piping networks: A review. *Advances in hydroinformatics*, 465–480.
- A la Nación, I. (2015). La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro. *Centro*.
- Albawi, S., & Mohammed, T. A. (2017). i saad al-zawi. In *Understanding of a convolutional neural network. u 2017 international conference on engineering and technology (icet), stranice* (pp. 1–6).
- Alonso, F. y. G. D. y. H. V. y. R. P. A. y. V. A. M. y. M. F. y. V. J. y. U. B., José M y Alvarruiz. (2000). Parallel computing in water network analysis and leakage minimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126(4), 251–260.
- Araujo, L., Coelho, S., & Ramos, H. (2003). Estimation of distributed pressure-dependent leakage and consumer demand in water supply networks. *Advances in Water Supply Manament, Maksimovic, C.; Butler, D.; Memon, FA (eds.), Swets and Zeillinger, Lisse*, 119–128.
- Araujo, L., Ramos, H., & Coelho, S. (2006). Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management. *Water resources management*, 20, 133–149.
- Chollet, F. (2017). *Deep learning with python, Istedn*. Manning Publications Co., Greenwich, CT, USA.
- Fernández, G. A. A. (2021). Diseño de una metodología general para la identificación de elementos críticos en redes de distribución de agua potable. Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Gerald, C., & Wheatley, P. (2009). *Applied Numerical Analysis*, Addison-wesley, Reading, MA.
- Germanopoulos, G. (1985). A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models. *Civil Engineering Systems*, 2(3), 171–179.
- Géron, A. (2017). Hands-on machine learning with scikit-learn and tensorflow: Concepts. *Tools, and Techniques to build intelligent systems*.

- Hindi, Y., KS y Hamam. (1991). Locating pressure control elements for leakage minimization in water supply networks: An optimization model. *Engineering optimization*, 17(4), 281–291.
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2021). Informe anual.
- Jowitt, C., Paul W y Xu. (1990). Optimal valve control in water-distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 116(4), 455–472.
- Kalagnanam, J. R., & Diwekar, U. M. (1997). An efficient sampling technique for off-line quality control. *Technometrics*, 39(3), 308–319.
- Klise, K. A., Hart, D., Moriarty, D. M., Bynum, M. L., Murray, R., Burkhardt, J., & Haxton, T. (2017). *Water network tool for resilience (wntr) user manual* (Tech. Rep.). Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States).
- Lambert, A. (1997). Pressure management/leakage relationships: Theory, concepts and practical applications. In *IQPC Seminar, London*.
- Lambert, A. (2001). What do we know about pressure-leakage relationships in distribution systems. In *IWA Conf. Systems approach to leakage control and water distribution system management*.
- Lambert, A., Brown, T. G., Takizawa, M., & Weimer, D. (1999). A review of performance indicators for real losses from water supply systems. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 48(6), 227–237.
- Lambert, Ä. O. (2002). International report: water losses management and techniques. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2(4), 1–20.
- Lau, M., & Lim, K. H. (2018). Review of adaptive activation function in deep neural network. In *2018 IEEE-EMBS Conference on Biomedical Engineering and Sciences (IECBES), BCCK, Kuching, Sarawak, Malaysia* (pp. 686–690).
- Leshno, M., Lin, V. Y., Pinkus, A., & Schocken, S. (1993). Multilayer feedforward networks with a nonpolynomial activation function can approximate any function. *Neural networks*, 6(6), 861–867.
- Lingireddy, S., & Ormsbee, L. E. (1998). Neural networks in optimal calibration of water distribution systems. In *Artificial neural networks for civil engineers: Advanced features and*

applications (pp. 53–76). ASCE.

- Lobos, J. I., Constanzo. (2022). Detección y localización de fugas en redes de distribución de agua potable en una gran ciudad de Chile mediante un algoritmo de clasificación de redes neuronales.
- Marunga, Z. y. K. E., Antony y Hoko. (2006). Pressure management as a leakage reduction and water demand management tool: The case of the city of Mutare, Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31(15-16), 763–770.
- May, J. (1994). Leakage, pressure and control. In *Bics international conference on leakage control, London, UK*.
- Nazif. (2010). Pressure management model for urban water distribution networks. *Water resources management*, 24(3), 437–458.
- ONU. (2019). Informe de políticas de ONU-AGUA sobre el cambio climático y el agua. *UN water: Suiza*.
- Özdemir, Ö., Fırat, M., Yılmaz, S., & Usluer, M. (2021). Analysis of the effect of pressure control on leakages in distribution systems by Hagen-Poiseuille equation and field applications. *Water Practice and Technology*, 16(2), 320–332.
- Puterman, M. L. (2014). *Markov decision processes: discrete stochastic dynamic programming*. John Wiley & Sons.
- Ramchoun, H., Ghanou, Y., Ettaouil, M., & Janati Idrissi, M. A. (2016). Multilayer perceptron: Architecture optimization and training.
- Roth, G. A. S., & Cue, T. (1992). *Holland, Jh (1975). Adaptation in natural and artificial systems. Ann Arbor: University of Michigan Press. 14] Cambridge, Ma: MIT Press. Citeseer*.
- Reis, F. H., FR y Chaudhry. (1999). Hydraulic characteristics of pressure reducing valves for maximum reduction of leakage in water supply networks. *Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications*, 1(1), 259–267.
- Royal Society of Great Britain. (2017). Machine learning : the power and promise of computers that learn by example (vol. 66) (n.o January). *Royal Society open science*, 66.
- Sivanandam, S., Deepa, S., & Sivanandam. (2008). *Genetic algorithms*. Springer.

- Superintendencia de Servicios Sanitarios. (2020). Informe gestión sector sanitario.
- Swamee, P. K., Tyagi, A., & Shandilya, V. K. (1999). Optimal configuration of a wellfield. *Groundwater*, 37(3), 382–386.
- Tabesh, M., Yekta, A., & Burrows, R. (2009). An integrated model to evaluate losses in water distribution systems. *Water Resources Management*, 23(3), 477–492.
- Thornton, J., & Lambert, A. (2007). Pressure management extends infrastructure life and reduces unnecessary energy costs. In *IWA Conference Water Loss, Bukarest, Romania*.
- Todini, E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban water*, 2(2), 115–122.
- Ulanicka, P. y U. B. y R. J., K y Bounds. (2001). Pressure control of a large scale water distribution network with interacting water sources-a case study. *Water software systems: Theory and applications*, 2, 41–53.
- Vairavamoorthy, J., Kalanithy y Lumbers. (1998). Leakage reduction in water distribution systems: Optimal valve control. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(11), 1146–1154.
- Vítkovský, A. R. y L. M. F., John P y Simpson. (2000). Leak detection and calibration using transients and genetic algorithms. *Journal of water resources planning and management*, 126(4), 262–265.

ANEXOS

A continuación, se presentarán los valores obtenidos de las influencias acumuladas para la red experimental 1 y 2, y también se mostrarán los gráficos obtenidos de influencia acumulada para cada presión de control, de cada válvula escogida.

A. ANEXO A

Tabla A.1. Influencias acumuladas Red experimental 1.

Tubería	Influencia acumulada [$m^{3/2}$]
1	0.00
2	0.00
4	0.00
5	3.75
7	0.00
8	1.03E-09
10	0.00
13	0.00
14	0.00
15	23.97
16	0.00
19	0.00
20	0.00
21	3.72
24	3.74
25	0.00
26	0.00
27	0.00

Tabla A.1. Influencias acumuladas Red experimental 1.

Tubería	Influencia acumulada [$m^{3/2}$]
28	3.71
31	0.00
32	0.00
33	0.00
34	0.00
36	0.00
37	0.00
38	0.00
39	0.00
40	0.00
41	30.99
42	0.00
43	0.00
44	0.00
45	0.00
49	0.00
50	0.00
51	0.00
52	0.00
53	0.00
54	0.00
55	0.00
57	0.00
58	0.00

Tabla A.1. Influencias acumuladas Red experimental 1.

Tubería	Influencia acumulada [$m^{3/2}$]
59	0.00
60	0.00
61	0.00
62	0.00
63	0.00
65	0.00
67	0.00
68	0.00
69	0.00
70	0.00
71	0.00
74	1.03E-09
75	0.00
76	0.00
77	0.00
78	0.00
82	0.00
86	3.74
87	10.85
88	14.09
89	0.00
95	3.74
96	0.00
Reservorio 1	139.08

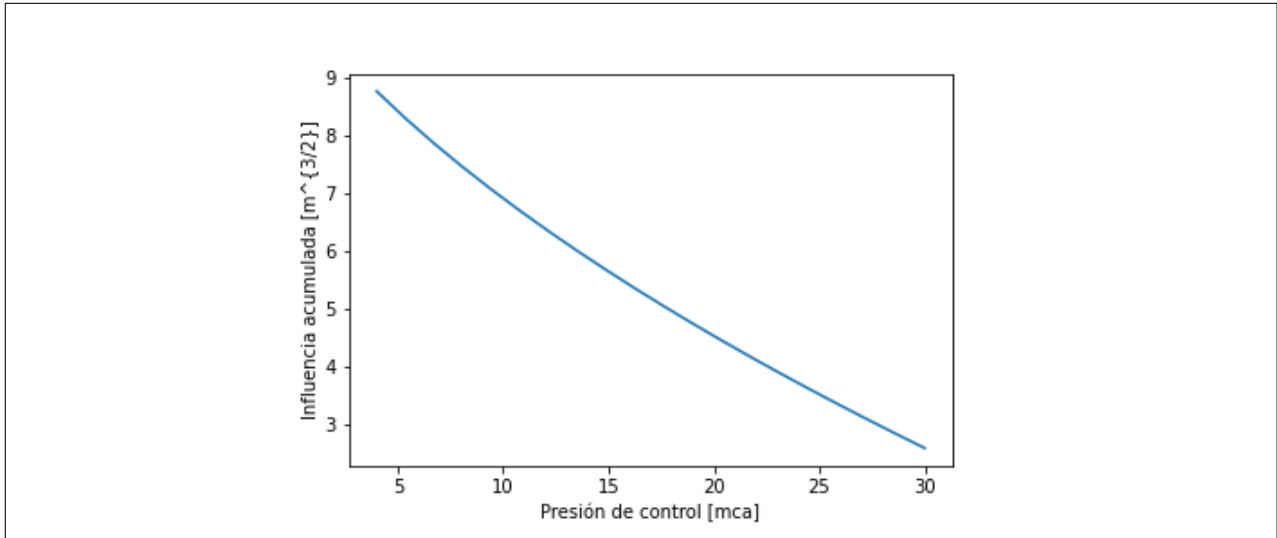


Figura A.1. Influencia en tubería del reservorio cuando se disminuye presión de control.

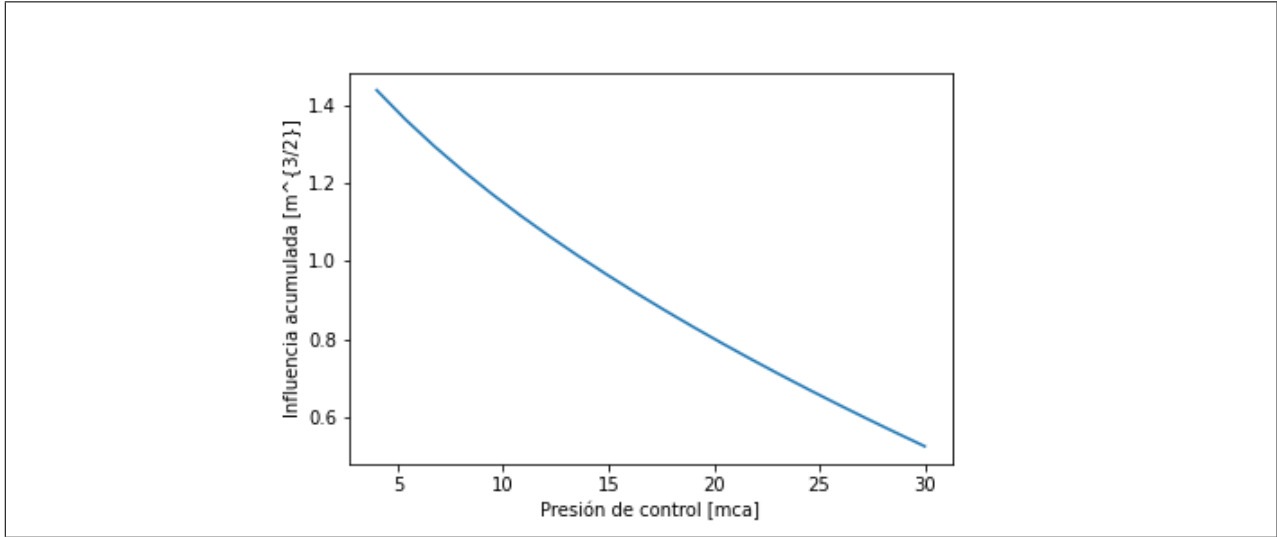


Figura A.2. Influencia en tubería 15 cuando se disminuye presión de control.

B. ANEXO B

Tabla B.1. Influencias acumuladas Red experimental 2.

Tubería	Influencia acumulada [$m^{3/2}$]
3	0.00
5	0.00
6	1.19E-08
9	3.76
11	2.92E-09
12	2.93E-09
14	0.00
15	6.42E-09
17	0.00
18	0.00
19	0.00
20	2.78E-09
21	0.00
23	0.00
24	5.89E-09
26	0.00
28	0.00
29	7.99E-09
30	0.00
32	0.00
33	0.00
34	41.22
35	0.00

Tabla B.1. Influencias acumuladas Red experimental 2.

Tubería	Influencia acumulada [$m^{3/2}$]
36	0.00
37	1.86E-09
38	0.00
39	0.00
41	0.00
42	0.00
44	0.00
45	0.00
46	1.17E-09
47	0.00
48	0.00
49	0.00
50	0.00
51	0.00
52	64.61
53	0.00
54	0.00
57	0.00
59	7.33
60	3.72
62	0.00
63	0.00
64	-5.01E-09
65	-3.38E-09

Tabla B.1. Influencias acumuladas Red experimental 2.

Tubería	Influencia acumulada [$m^{3/2}$]
66	4.29E-09
71	0.00
72	0.00
73	-1.58E-08
74	-1.08E-08
75	2.52E-08
80	0.00
82	0.00
83	0.00
84	13.74
85	10.56
89	7.27
90	3.73
93	0.00
94	0.00
95	3.89E-09
96	0.00
97	0.00
98	0
99	9.10E-09
101	9.20E-09
102	3.07E-09
103	0.00
104	0.00

Tabla B.1. Influencias acumuladas Red experimental 2.

Tubería	Influencia acumulada [$m^{3/2}$]
105	0.00
106	0.00
107	0.00
108	0.00
109	1.00E-08
110	-1.09E-08
111	3.92E-09
112	2.42E-09
113	1.60E-09
114	0.00
115	0.00
116	0.00
117	1.24E-07
118	5.56E-09
119	2.26E-09
120	0.00
121	0.00
122	0.00
123	0.00
124	0.00
125	0.00
127	0.00
128	4.04E-09
129	0.00

Tabla B.1. Influencias acumuladas Red experimental 2.

Tubería	Influencia acumulada [$m^{3/2}$]
130	0.00
131	0.00
132	10.88
134	3.69
135	7.18
136	4.26E-09
137	3.78E-09
138	0.00
139	0.00
140	0.00
145	9.77E-09
146	0.00
147	0.00
148	7.59E-09
149	0.00
154	3.76
155	0.00
156	0.00
158	0.00
159	0.00
160	0.00
161	0.00
162	10.64
163	7.45

Tabla B.1. Influencias acumuladas Red experimental 2.

Tubería	Influencia acumulada [$m^{3/2}$]
164	0.00
165	0.00
167	0.00
168	0.00
169	0.00
170	0.00
173	0.00
174	0.00
176	0.00
177	0.00
178	0.00
Reservorio 1	0.00
Reservorio 2	0.00

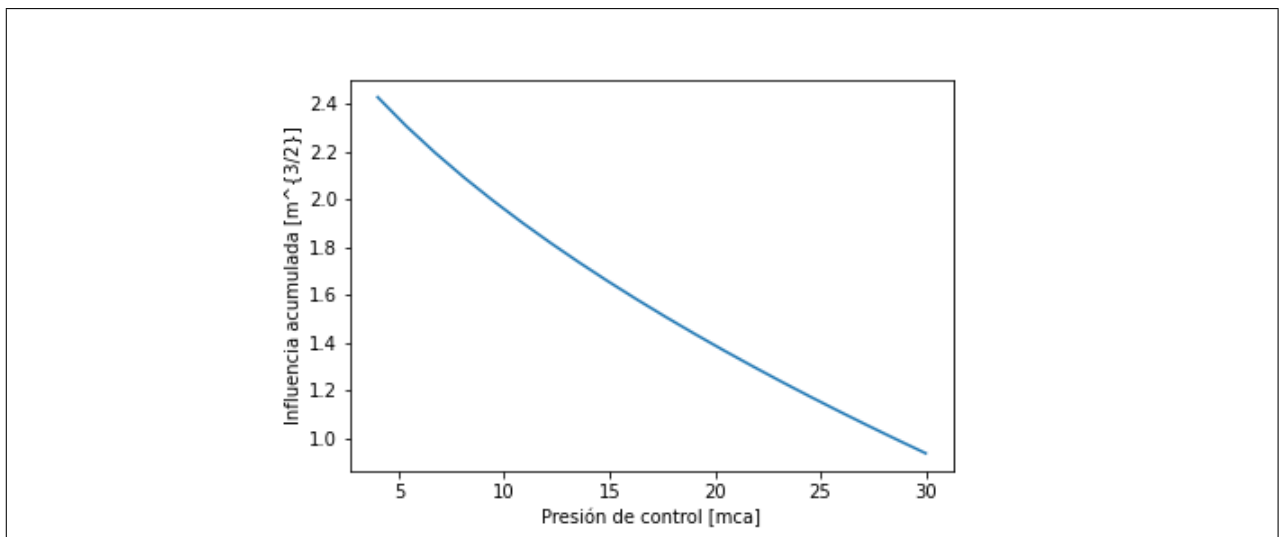


Figura B.1. Influencia en tubería 34 cuando se disminuye presión de control.

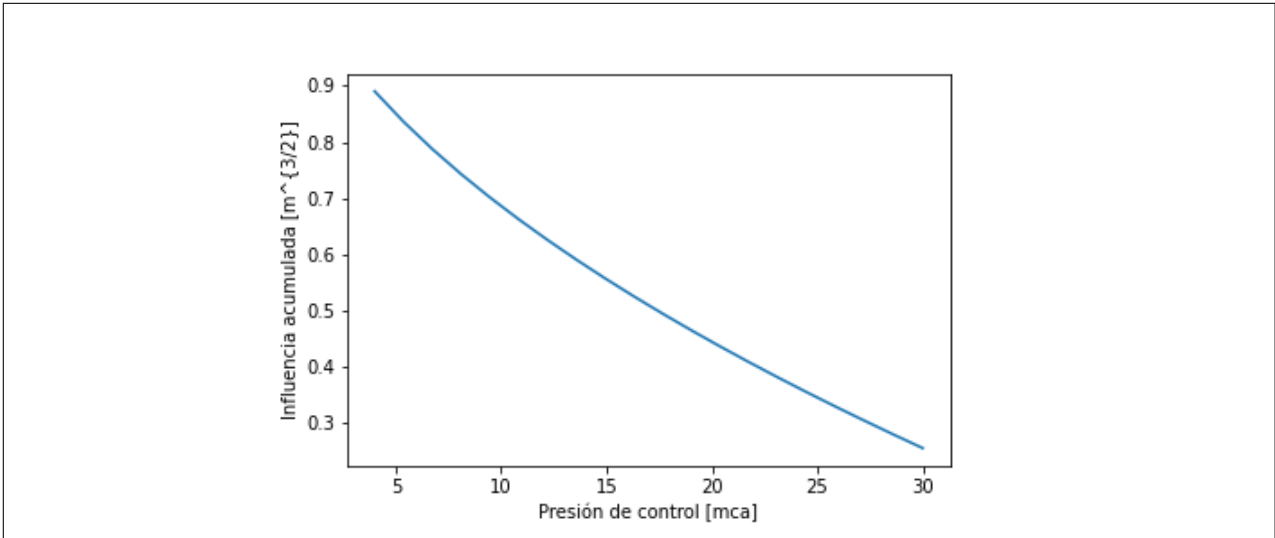


Figura B.2. Influencia en tubería 84 cuando se disminuye presión de control.

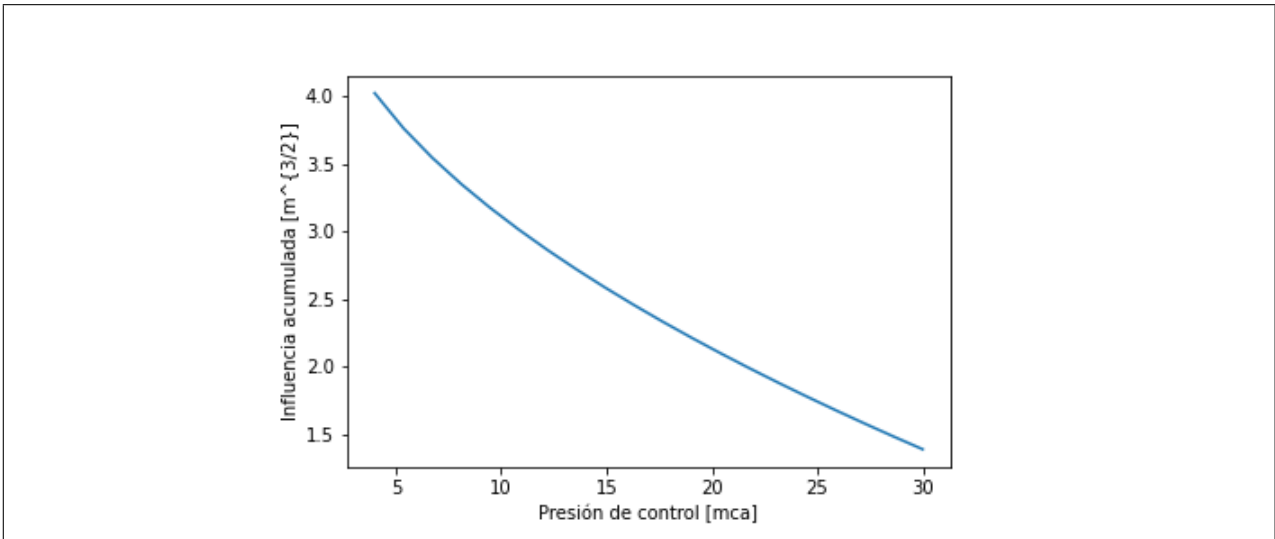


Figura B.3. Influencia en tubería 52 cuando se disminuye presión de control.