

Entorno de Modelación Hidráulica en Python para el Análisis y Optimización de Redes de
Distribución de agua Potable

Manuel Mauricio Magdaniel Cortés

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingenierías y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Ambiental, Civil y Química

Programa de Ingeniería Civil

Pamplona, Norte de Santander

2025

Entorno de Modelación Hidráulica en Python para el Análisis Y Optimización de Redes de
Distribución de agua Potable

Manuel Mauricio Magdaniel Cortés

1006615708

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

Msc. Carlos Alexis Bonilla Granados.

Codirector 1

Codirector 2

Msc. Diego Iván Sánchez Tapiero

Ing. Civil Dayana Josefa Ortiz Campo

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingenierías y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Ambiental, Civil y Química

Programa Ingeniería Civil

Pamplona, Norte de Santander

2025

Dedicatoria

*A Dios, por acompañarme en todo momento y darme el valor para afrontar las adversidades,
por ser mi guía para no perder el rumbo y por brindarme la oportunidad de ser cada día
mejor persona.*

*A mi madre Alexi Cortés Guerra, por su amor incondicional, por darme ánimos en los
momentos difíciles y compartir su alegría conmigo en los momentos felices, por sus valiosos
consejos que me han fortalecido y hecho mejor persona y que siempre los llevo presente a
cada paso que doy.*

*A mi padre Hilfreth Neil Magdaniel Cabrales, por demostrarme que con esfuerzo podemos
conseguir todo lo que nos propongamos y por dedicar su tiempo a enseñarme e instruirme
por el camino correcto.*

*A mi hermana Gabriela Sofía Magdaniel Cortés, por ser una gran compañera y brindarme
todo su amor.*

*Este logro va dirigido con mucho amor a ustedes que fueron parte fundamental de este
proceso y que, con paciencia, apoyo y esfuerzo, juntos lo hicimos realidad. Gracias.*

Agradecimientos

A la Universidad de Pamplona por haberme acogido y permitido realizar mis estudios para convertirme en profesional. Agradezco todas las enseñanzas y aprendizajes obtenidos a lo largo de la carrera, que el día de mañana serán vitales para ejercer como profesional.

Al Msc. Carlos Alexis Bonilla Granados director de mi proyecto, por depositar su apoyo, atención y confianza en mí desde el momento de la realización de la propuesta, hasta el momento de finalización del trabajo.

Al Msc. Diego Sánchez codirector de mi proyecto, por instruirme e indicarme el camino a seguir siempre que lo necesitaba y cuyo seguimiento y asesoramiento fueron invaluable en cada paso del desarrollo del proyecto.

A mis amigos y compañeros de estudio, con los que superé retos y cumplí metas, sin ustedes no hubiera sido lo mismo, gracias por acompañarme en este recorrido.

Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS.....	14
1.1. Objetivo General.....	14
1.2. Objetivos Específicos.....	14
2. MARCO REFERENCIAL	15
2.1. Marco de Antecedentes.....	15
2.2. Marco Teórico.....	27
2.2.1. Ecuaciones fundamentales.....	27
2.2.2. Resiliencia.....	30
2.3. Marco Conceptual.....	33
2.3.1. Red de distribución de agua	33
2.3.2. Representación física de la red.....	35
2.3.3. Componentes no físicos de la red	36
2.3.4. Temporalidad a la hora de la modelación.....	37
2.3.5. Magnitudes.....	37
2.3.6. Epanet	38
2.3.7. Python	39
2.3.8. Amenazas en las redes de distribución de agua potable	39
2.3.9. Water Network Tool for Resilience (WNTR)	40
2.4. Marco Legal.....	41
2.4.1. Resolución No. 0330 de 8 de junio de 2017.....	41
2.4.2. Resolución No. 799 de 9 de diciembre de 2021	42
2.4.3. Objetivos de desarrollo sostenible.....	42
2.4.4. Licencia de uso del paquete PyQt5.....	43
3. METODOLOGÍA.....	45
3.1. Estudio de las herramientas disponibles	46
3.1.1. Water Network Tool for Resilience (WNTR)	47
3.1.2. Pandas.....	47
3.1.3. Matplotlib.....	47
3.1.4. PyQt5	47
3.2. Evaluación de los parámetros de los elementos que conforman la red.....	47
3.3. Codificación de las capacidades del entorno	49
3.3.1. Clases Principales	49
3.3.2. Clases Auxiliares	53

3.4.	Codificación del entorno de trabajo e interfaz	57
3.5.	Optimización y depuración del código	57
3.6.	Validación de la metodología	58
3.6.1.	<i>Casos de estudio</i>	59
3.6.2.	<i>Evaluación de casos en el entorno de modelación hidráulica</i>	63
3.6.3.	<i>Evaluación de casos en EPANET</i>	70
4.	RESULTADOS	71
4.1.	Ventana principal	71
4.2.	Módulos	72
4.2.1.	<i>Abrir Archivo</i>	73
4.2.2.	<i>Exportar Archivo</i>	73
4.2.3.	<i>Diseñar</i>	74
4.2.4.	<i>Modelar</i>	75
4.2.5.	<i>Simulación Epanet</i>	76
4.2.6.	<i>Simular Fugas</i>	76
4.2.7.	<i>Simular Terremoto</i>	78
4.2.8.	<i>Análisis de Resiliencia</i>	80
4.2.9.	<i>Opciones</i>	80
4.3.	Evaluación de casos en el entorno de modelación hidráulica.....	82
4.3.1.	<i>Evaluación caso Net1</i>	82
4.3.2.	<i>Evaluación caso Red_Caso1</i>	97
4.3.3.	<i>Evaluación caso red.Qmd</i>	111
4.4.	Evaluación de casos en Epanet	126
4.4.1.	<i>Evaluación caso Net1</i>	126
4.4.2.	<i>Evaluación caso Red_Caso1</i>	132
4.4.3.	<i>Evaluación caso red.Qmd</i>	136
5.	CONCLUSIONES.....	141
6.	RECOMENDACIONES	144
7.	REFERENCIAS	146

Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama de las Etapas de la Metodología	46
Figura 2. Clases Principales desarrolladas	52
Figura 3. Clases Auxiliares desarrolladas	53
Figura 4. Archivo Excel para creación de redes de distribución.....	56
Figura 5. Clase <i>VentanaPrincipal</i>	57
Figura 6. Red “Net1”	59
Figura 7. Patrón de demanda de los nodos de consumo de la red “Net1”	60
Figura 8. Red “Red_Caso1”.....	61
Figura 9. Patrón de demanda de los nodos de consumo de la red “Red_Caso1”	61
Figura 10. Red “red.Qmd”	62
Figura 11. Patrón de demanda de los nodos de consumo de la red “red.Qmd”	63
Figura 12. Ventana principal	72
Figura 13. Ventana de selección de archivo de la red a cargar	73
Figura 14. Ventana de exportación del archivo de la red	74
Figura 15. Flujo de ejecución del módulo Diseñar	75
Figura 16. Ventana modelar elementos de la red	76
Figura 17. Interfaz para configurar fugas en la red.....	77
Figura 18. Interfaz para configurar evento sísmico en la red	79
Figura 19. Interfaz para el análisis de la resiliencia.....	80
Figura 20. Ventana para la configuración de las opciones del modelo de la red.....	81
Figura 21. Mapa de presiones en la red Net1 original	82
Figura 22. Mapa de velocidades en la red Net1 original	83
Figura 23. Rango de presiones registradas en la simulación para cada diseño de la red Net1	85
Figura 24. Rango de velocidades registradas en la simulación para cada diseño de la red Net1	85
Figura 25. Representación de la red Net1 después de haber sido rediseñada.....	86
Figura 26. Mapa de presiones en la red Net1 rediseñada	87
Figura 27. Mapa de velocidades en la red Net1 rediseñada.....	87
Figura 28. Distribución de presiones en los nodos en la hora 3 para la red Net1	88
Figura 29. Distribución de demandas en los nodos en la hora 3 para la red Net1	89
Figura 30. Distribución de velocidades en las tuberías en la hora 3 para la red Net1	89
Figura 31. Distribución de caudales en las tuberías en la hora 3 para la red Net1	90
Figura 32. Mapa de presiones en la red Net1 con presencia de fuga.....	92
Figura 33. Distribución de presiones en los nodos de la red Net1 en la hora 3 con presencia de fuga	93
Figura 34. Mapa de presiones en la red Net1 en la hora 24 de la simulación del sismo sin aplicar reparaciones de fugas.....	94
Figura 35. Mapa de presiones en la red Net1 en la hora 24 de la simulación del sismo al aplicar reparación de fugas	95
Figura 36. Distribución de presiones en los nodos de la red Net1 en la hora 24 de la simulación del sismo sin aplicar reparaciones de fugas	96
Figura 37. Distribución de presiones en los nodos de la red Net1 en la hora 24 de la simulación del sismo al aplicar reparación de fugas	97
Figura 38. Rango de presiones registradas en la simulación después de diseñar la red Red_Caso1	99

Figura 39. Rango de velocidades registradas en la simulación después de diseñar la red Red_Caso1	100
Figura 40. Mapa de presiones en la red Red_Caso1 diseñada	100
Figura 41. Mapa de velocidades en la red Red_Caso1 rediseñada	101
Figura 42. Distribución de presiones en los nodos en la hora 9 para la red Red_Caso1	102
Figura 43. Distribución de demandas en los nodos en la hora 9 para la red Red_Caso1	102
Figura 44. Distribución de velocidades en las tuberías en la hora 9 para la red Red_Caso1	103
Figura 45. Distribución de caudales en las tuberías en la hora 9 para la red Red_Caso1	104
Figura 46. Mapa de presiones en la red Red_Caso1 con presencia de fuga	106
Figura 47. Distribución de presiones en los nodos de la red Red_Caso1 en la hora 9 con presencia de fuga	107
Figura 48. Mapa de presiones en la red Red_Caso1 en la hora 24 de la simulación del sismo sin aplicar reparaciones de fugas	108
Figura 49. Mapa de presiones en la red Red_Caso1 en la hora 24 de la simulación del sismo al aplicar reparación de fugas	109
Figura 50. Distribución de presiones en los nodos de la red Red_Caso1 en la hora 24 de la simulación del sismo sin aplicar reparaciones de fugas	110
Figura 51. Distribución de presiones en los nodos de la red Red_Caso1 en la hora 24 de la simulación del sismo al aplicar reparación de fugas	111
Figura 52. Rango de presiones registradas en la simulación después de diseñar la red red.Qmd	113
Figura 53. Rango de velocidades registradas en la simulación después de diseñar la red red.Qmd	114
Figura 54. Mapa de presiones en la red red.Qmd diseñada	115
Figura 55. Mapa de velocidades en la red red.Qmd rediseñada	116
Figura 56. Distribución de presiones en los nodos en la hora 5 para la red red.Qmd	117
Figura 57. Distribución de demandas en los nodos en la hora 5 para la red red.Qmd	118
Figura 58. Distribución de velocidades en las tuberías en la hora 5 para la red red.Qmd	118
Figura 59. Distribución de caudales en las tuberías en la hora 5 para la red red.Qmd	119
Figura 60. Mapa de presiones en la red red.Qmd con presencia de fuga	121
Figura 61. Distribución de presiones en los nodos de la red red.Qmd en la hora 5 con presencia de fuga	122
Figura 62. Mapa de presiones en la red red.Qmd en la hora 24 de la simulación del sismo sin aplicar reparaciones de fugas	123
Figura 63. Mapa de presiones en la red red.Qmd en la hora 24 de la simulación del sismo al aplicar reparación de fugas	123
Figura 64. Distribución de presiones en los nodos de la red red.Qmd en la hora 24 de la simulación del sismo sin aplicar reparaciones de fugas	124
Figura 65. Distribución de presiones en los nodos de la red red.Qmd en la hora 24 de la simulación del sismo al aplicar reparación de fugas	125
Figura 66. Mapa de presiones en la red Net1 rediseñada al evaluarla en Epanet	127
Figura 67. Mapa de velocidades en la red Net1 rediseñada al evaluarla en Epanet	128
Figura 68. Distribución de presiones en los nodos en la hora 3 para la red Net1 al evaluarla en Epanet	129
Figura 69. Distribución de demandas en los nodos en la hora 3 para la red Net1 al evaluarla en Epanet	129

Figura 70. Distribución de velocidades en las tuberías en la hora 3 para la red Net1 al evaluarla en Epanet.....	130
Figura 71. <i>Distribución de caudales en las tuberías en la hora 3 para la red Net1 al evaluarla en Epanet</i>	131
Figura 72. Mapa de presiones en la red Red_Caso1 diseñada al evaluarla en Epanet	132
Figura 73. Mapa de velocidades en la red Red_Caso1 diseñada al evaluarla en Epanet.....	133
Figura 74. Distribución de presiones en los nodos en la hora 9 para la red Red_Caso1 al evaluarla en Epanet	133
Figura 75. Distribución de demandas en los nodos en la hora 9 para la red Red_Caso1 al evaluarla en Epanet	134
Figura 76. Distribución de velocidades en las tuberías en la hora 9 para la red Red_Caso1 al evaluarla en Epanet	134
Figura 77. Distribución de caudales en las tuberías en la hora 9 para la red Red_Caso1 al evaluarla en Epanet	135
Figura 78. Mapa de presiones en la red red.Qnd diseñada al evaluarla en Epanet.....	137
Figura 79. Mapa de velocidades en la red red.Qnd diseñada al evaluarla en Epanet	138
Figura 80. Distribución de presiones en los nodos en la hora 5 para la red red.Qmd al evaluarla en Epanet.....	139
Figura 81. Distribución de demandas en los nodos en la hora 5 para la red red.Qmd al evaluarla en Epanet.....	139
Figura 82. Distribución de velocidades en las tuberías en la hora 5 para la red red.Qmd al evaluarla en Epanet	140
Figura 83. Distribución de caudales en las tuberías en la hora 5 para la red red.Qmd al evaluarla en Epanet.....	140

Lista de Tablas

Tabla 1. Unidades en Sistema Internacional	48
Tabla 2. Valores de presión y velocidad para el diseño original de la red Net1	82
Tabla 3. Diámetros adoptados para las tuberías de la red Net1	84
Tabla 4. Cálculo de la resiliencia de la red Net1 mediante el Índice de Todini	91
Tabla 5. Cálculo de la resiliencia de la red Net1 mediante el Índice de Resiliencia Modificado	91
Tabla 6. Diámetros adoptados para las tuberías de la red Red_Caso1	98
Tabla 7. Cálculo de la resiliencia de la red Red_Caso1 mediante el Índice de Todini	104
Tabla 8. Cálculo de la resiliencia de la red Red_Caso1 mediante el Índice de Resiliencia Modificado	105
Tabla 9. Diámetros adoptados para las tuberías de la red red.Qmd	112
Tabla 10. Cálculo de la resiliencia de la red red.Qmd mediante el Índice de Todini	120
Tabla 11. Cálculo de la resiliencia de la red red.Qmd mediante el Índice de Resiliencia Modificado	120

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolló un entorno de modelación hidráulica en Python, enfocado en el análisis y optimización de redes de distribución de agua potable. Este proyecto se llevó a cabo con el propósito de abordar desafíos específicos en la operación de redes hidráulicas, como la gestión de eventos disruptivos tales como fugas en tuberías, eventos sísmicos, la evaluación de métricas de resiliencia y la mejora en el diseño de la infraestructura dentro de un marco normativo colombiano.

La implementación se realizó integrando el paquete WNTR, que permitió crear un sistema capaz de modelar redes de distribución, simular diferentes escenarios y analizar su comportamiento. Entre las funcionalidades desarrolladas destacan el diseñar redes bajo la normativa, la simulación de fugas, simulación de terremotos, la generación de gráficos de red y la evaluación de indicadores de resiliencia, como el Índice de Todini y el Índice de Resiliencia Modificado. Además, el entorno permite la interacción con archivos Excel para la entrada de datos, facilitando el diseño y simulación en diversos casos de estudio y aumentando su accesibilidad para distintos usuarios.

El desarrollo del entorno tuvo como marco de referencia la normativa de las Resoluciones 0330 del 2017 y 799 del 2021, asegurando que los diseños cumplieran con los estándares exigidos en Colombia. Esto no solo garantizó la validez técnica de los resultados, sino que también permitió trabajar dentro de un contexto normativo aplicable. Adicionalmente, se evaluaron los resultados con respecto al software EPANET, lo que permitió validar los resultados obtenidos y demostrar las capacidades adicionales del entorno. Estas capacidades incluyen un enfoque en la resiliencia y la capacidad para generar y representar escenarios disruptivos, elementos que no están presentes de forma nativa en herramientas como EPANET.

ABSTRACT

In the present work, a hydraulic modeling environment in Python was developed, focused on the analysis and optimization of drinking water distribution networks. This project aimed to address specific challenges in the operation of hydraulic networks, such as managing disruptive events such as pipeline leaks and seismic events, assessing resilience metrics and improving infrastructure design within a Colombian regulatory framework.

The implementation was conducted by integrating the WNTR package, which allowed the creation of a system capable of modeling distribution networks, simulating different scenarios and analyzing their behavior. The developed functionalities include network design according to regulations, leak simulation, earthquake simulation, network graph generation, and the evaluation of resilience indicators such as the Todini Index and the Modified Resilience Index. In addition, the environment allows interaction with Excel files for data input and output, facilitating the design and simulation in various case studies and increasing its accessibility for different users.

The development of the environment was guided by the regulations of Resolutions 0330 of 2017 and 799 of 2021, ensuring that the designs met the standards required in Colombia. This not only guaranteed the technical validity of the results but also allowed for work within an applicable regulatory context. Furthermore, the results were compared with those obtained using the EPANET software, validating the accuracy of the developed tool and demonstrating its additional capabilities. These capabilities include a focus on resilience and the ability to generate and represent disruptive scenarios, features not natively available in tools like EPANET.

INTRODUCCIÓN

El abastecimiento de agua potable es una de las principales prioridades para el desarrollo humano, siendo esencial para la supervivencia, el bienestar y la calidad de vida de las comunidades. Las redes de distribución de agua potable, encargadas de garantizar el suministro continuo y seguro del recurso hídrico, enfrentan desafíos críticos derivados del crecimiento poblacional, el deterioro de las infraestructuras, y la incidencia de eventos disruptivos.

A nivel técnico, problemáticas como la obsolescencia de la infraestructura, el manejo ineficiente del recurso y la falta de resiliencia ante situaciones adversas generan interrupciones en el servicio, pérdidas económicas y disminución de la calidad del agua distribuida. En este contexto, herramientas tecnológicas avanzadas se han convertido en aliados indispensables para diseñar y operar sistemas más eficientes.

La fundamentación de este proyecto se encuentra enmarcada en la normativa colombiana, específicamente en las Resoluciones No. 0330 de 2017 y No. 799 de 2021, las cuales establecen la obligatoriedad de contar con modelos hidráulicos en sistemas de distribución de agua potable para predecir su comportamiento y planificar estrategias de mantenimiento y expansión. Además, el proyecto se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), contribuyendo a garantizar agua limpia y saneamiento (ODS-6), promover infraestructuras resilientes (ODS-9) y construir comunidades sostenibles (ODS-11).

El presente trabajo empleó el paquete Water Network Tool for Resilience (WNTR) para el desarrollo del entorno, el cual integra distintos módulos implementados para diseñar y modelar redes de distribución de agua potable, simular la hidráulica de la red y eventos disruptivos como fugas y terremotos. Además, la herramienta permite graficar los resultados obtenidos de las distintas simulaciones y calcular y verificar métricas clave como el índice de resiliencia y el índice de resiliencia modificado, para analizar del estado y operatividad de esta.

1. OBJETIVOS

1.1.Objetivo General

Desarrollar el entorno de modelación hidráulica en el lenguaje de programación Python, para analizar y optimizar la funcionalidad de las redes de distribución de agua potable.

1.2.Objetivos Específicos

- Crear algoritmos en Python implementando el paquete WNTR para el diseño y modelación hidráulica de redes de distribución de agua potable.
- Elaborar algoritmos en Python utilizando el paquete WNTR para la simulación de eventos disruptivos y características de las redes.
- Establecer los métodos de ilustración de resultados y análisis de procesos ejecutados, para determinar el comportamiento de la red.
- Incorporar la lectura de los resultados arrojados utilizando métricas de resiliencia que determinen el estado, vulnerabilidad y riesgo de la red.
- Evaluar 3 casos de estudio teóricos poniendo a prueba las funcionalidades del entorno, y, posteriormente valorando los resultados en comparación con los del software Epanet.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1.Marco de Antecedentes

Abarca Aguilar, D. (2022). Marco De Análisis De Riesgo Multi-Amenaza En Redes De Agua Potable, presenta un trabajo de investigación en la que se propone una metodología de análisis de riesgo multi-amenaza de redes de agua potable, en donde se realizan simulaciones hidráulicas de la red en su estado normal y en un estado donde se ve afectada por distintos escenarios multi-amenaza y se comparan métricas hidráulicas calculadas a partir de los resultados de las simulaciones. Para realizar el análisis, se realiza un análisis hidráulico inicial a través del módulo de Python WNTR, luego se determinan escenarios utilizando modelos probabilísticos de las tres amenazas implementadas (sísmica, deterioro, e incendio debido a sismo o FFE), y se combinan estos escenarios para generar escenarios multi-amenaza. Para cada escenario multi-amenaza se cuantifica el daño sobre la red, el que se incorpora a la red y permite simular hidráulicamente la red en estado dañado para cada escenario multi-amenaza. Los resultados del análisis sobre la red en estado normal y los estados dañados se traducen en tres métricas hidráulicas (fracción de demanda cubierta o WSA, porcentaje de la red que cumple con presión requerida, porcentaje de la red que cumple con presión mínima) y una económica (multa debido a incumplimiento de presión promedio mínima normativa) que se manejan de distintas formas para generar mapas y curvas que permitan entender el efecto de las amenazas sobre la red.

Katherine A. Klise, Michael Bynum, Dylan Moriarty, Regan Murray. (2017). A Software Framework For Assessing The Resilience Of Drinking Water Systems To Disasters With An Example Earthquake Case Study, presentan en este artículo el paquete de código abierto Water Network Tool for Resilience (WNTR) diseñado para ayudar a las empresas de agua a investigar la resiliencia de los sistemas de distribución de agua ante los peligros y evaluar las acciones para mejorar la resiliencia. En este artículo, se presenta el

marco de modelado WNTR y se describe un caso de estudio que utiliza WNTR para simular los efectos de un terremoto en un sistema de distribución de agua. El caso de estudio ilustra que la gravedad del daño no es sólo una función de la integridad del sistema y la magnitud del terremoto, sino también de los recursos disponibles y las estrategias de reparación utilizadas para devolver el sistema a sus condiciones normales de funcionamiento. Si bien los terremotos son particularmente preocupantes porque las tuberías de distribución de agua enterradas son muy susceptibles a sufrir daños, el marco del software se puede aplicar a otros tipos de peligros, incluidos cortes de energía e incidentes de contaminación. Los autores concluyen que a diferencia de las herramientas de modelado actuales, WNTR integra la simulación hidráulica y de la calidad del agua, una amplia gama de opciones de daño y respuesta, y métricas de resiliencia en un solo marco, lo que permite una evaluación perfecta de la resiliencia de la red de agua. El software puede ayudar a las empresas de servicios públicos de agua a estimar los daños potenciales, comprender cómo ocurrirían los daños a la infraestructura con el tiempo, evaluar las estrategias de preparación, priorizar las acciones de respuesta e identificar los peores escenarios, las estrategias de reparación eficientes y las mejores prácticas para el mantenimiento y las operaciones

Lewis A. Rossman. (2022). Epanet Manual, Rossman fue participante activo en el desarrollo del software EPANET bajo la dirección de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y es el escritor del manual de EPANET. EPANET es un programa informático que realiza simulaciones de período prolongado del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua dentro de redes de tuberías presurizadas. El manual describe cómo ejecutar la versión 2.2 del modelo de simulación del sistema de distribución de agua de EPANET, expone todas las funcionalidades del programa, tales como, realizar modelos y como trabajar con estos, las simulaciones del comportamiento de la red y la modelación de la hidráulica de la misma, comandos, propiedades de los elementos de una red, opciones de

configuración de estos elementos, las opciones disponibles para el gráfico y presentación de resultados, además, ofrece ejemplos variados y de distintas complejidades para que el usuario se familiarice con el software. El manual expone con claridad todo lo que necesitaría saber desde un estudiante que apenas está cursando su pregrado hasta un servidor público experimentado en el uso y manejo del recurso hídrico de las redes de distribución de agua potable.

Lucinda-Joi Chu-Ketterer, Jonathan Burkhardt, Katherine Klise, Terranna Haxton. (2022). Embracing Analytics in the Drinking Water Industry, los autores presentan el capítulo 12 del libro “Embracing Analytics in the Drinking Water Industry”, en este capítulo se expone una guía para el uso del paquete WNTR y analiza los desafíos que los desastres plantean a la infraestructura de WDS y el proceso para aplicar WNTR para evaluar estos desafíos; los pasos para instalar WNTR; los tipos de desastres que se pueden modelar actualmente; las métricas de resiliencia disponibles; comentan en detalle todos los beneficios y capacidades que contempla el paquete e inducen a pequeños tutoriales de cómo utilizarlo y familiarizarse con este, se nos exponen ejemplos variados y una explicación detallada de cómo funciona WNTR. Además, los autores comentan que el paquete WNTR se está utilizando y ampliando activamente dentro de la comunidad de Análisis de sistemas de distribución de agua para una variedad de áreas temáticas.

Molina López, G. E. (2011). Modelización Con Epanet De Las Redes De Transporte De Agua Potable De La Ciudad De Cartagena, presenta un estudio en el que se hace uso del programa de uso libre Epanet con el fin de simular la red principal de abastecimiento de agua potable en la ciudad de Cartagena. Para ello, se estudiaron las conducciones principales, denominadas redes de transporte, que dan servicio a diferentes sectores hidráulicos, en los que se divide la ciudad de Cartagena, mediante válvulas principales de la red, con el fin de obtener una malla capaz de abastecer todos los puntos

de consumo. En Epanet se introdujeron datos de cotas, longitudes, diámetros, rugosidades y demandas, así como datos de depósitos para obtener una representación lo más exacta posible de la red.

Al iniciar el estudio se asignaron los consumos a los nudos de consumo del modelo. Además de los datos de consumo se introdujeron consignas de presión en válvulas reguladoras de presión. Una vez introdujeron los datos en el modelo se realizó la calibración del mismo comparando los resultados de presiones y caudales con los del SCADA. Realizaron modificaciones en los coeficientes de rugosidad de algunas conducciones para mejores ajustes. Finalmente, se estudió la distribución de los patrones de consumo horarios para 24 horas en la red, mediante la comprobación del ajuste a una distribución normal para la simulación de la curva patrón de consumo diario de la ciudad de Cartagena.

Palacios Capcha, J. P. (2019). Calibración de Modelo del Sistema de Distribución de Agua Potable del Sector Urbano De la Ciudad De Huánuco - 2018”, presenta una investigación en la que se analizaron los datos de entrada para el modelamiento hidráulico de redes de distribución de agua potable como son: topología de la red de distribución de agua existente, características topográficas del área influencia de la investigación, características de las tuberías que conforman la red de distribución de agua potable y el caudal de demanda por cada usuario y su variación durante el día (se determinó los patrones de demanda en base a registros históricos de consumo). El proceso de calibración del modelo hidráulico creado se realizó en base a los datos de presión registrados en puntos de control de la red de distribución de agua potable del sector urbano de la ciudad de Huánuco. Luego del analizar el consumo de agua por cada usuario ubicado espacialmente dentro del área de influencia de la investigación a partir del registro histórico del volumen de agua facturado mensual se ha implementado una base de datos que permite identificar demandas

según la ubicación espacial en tiempo real. La base de datos puede ser usada en aplicaciones móviles para su fácil manejo.

Robles Velasco, A. (2018). Diseño óptimo de redes de distribución de agua mediante algoritmos de búsqueda tabú, presenta un Trabajo de Fin de Máster que tiene como finalidad el desarrollo de un método de optimización que permite resolver el problema de diseño y planificación de redes hidráulicas de distribución. En este trabajo se diseñó un algoritmo de búsqueda tabú ajustando los parámetros a la problemática de estudio y para la validación del algoritmo se resolvió el problema de diseño de redes de distribución aplicado a la red de Alperovits, siendo una red utilizada por muchos autores en la literatura, permitiendo la comparación de los resultados obtenidos en este trabajo con los que obtuvieron otros autores aplicando otras técnicas de resolución. La ejecución del algoritmo se realizó usando el lenguaje de programación Python y, paquete WNTR, que permite la generación y simulación de redes hidráulicas.

Rodríguez Procel, W., Benavides Muñoz, H. (2021). Modelación hidráulica y calibración de redes de distribución de agua potable, presentan un estudio donde el objetivo fue modelar y analizar tres redes de distribución de agua potable; calibrarlas con el software Epanet Calibrator, y comparar sus resultados con Darwin Calibrator. Para este fin se utilizaron un caudalímetro ultrasónico y data loggers de presión que fueron configurados para registrar datos cada diez minutos; se obtuvo la media de los caudales en cada nudo de interés de la red, además, se utilizaron los datos de presión para ajustar cada red; al variar rugosidades se pudo calibrar y ajustar el modelo entre lo simulado matemáticamente con los datos obtenidos en campo. Mediante esta información se establecieron ecuaciones y curvas de calibración para discriminar la discrepancia entre lo modelado y lo observado en campo. Las calibraciones hidráulicas se hicieron mediante las fórmulas de Darcy-Weisbach y Hazen-Williams. Finalmente, estas dos aplicaciones computacionales arrojaron resultados similares entre los

datos de lo simulado y lo observado con la diferencia de que la calibración en Epanet se hace nudo por nudo, mientras que en Darwin Calibrator puede efectuarse mediante grupos de calibraciones en un determinado sector.

Villagrán Corrales, G. (2018). Simulación y optimización dinámica de redes de agua en Python, expone tres conclusiones que certifican sus resultados, en ellas especifica la veracidad de la investigación y qué puntos de referencia tomó para determinarlo así:

A lo largo del trabajo de fin de grado, se le ha dado mucha importancia al modelado de la red, ya que es un punto clave para confiar en los datos que obtenemos dentro de la simulación en Spyder. Podemos fiarnos de los resultados obtenidos en nuestro código ya que en la comparación con los resultados que nos ofrece Epanet, salen soluciones casi exactamente iguales. Entonces podemos determinar qué tanto como nuestro modelado como el método de integración del sistema es correcto. El sistema de simulación se ha realizado para una red genérica que contenga válvulas reguladoras y estaciones de bombas, siempre y cuando sigamos la pauta de como introducir estos elementos dentro del código. Lo demás elementos se contemplan en su totalidad.

El desarrollo del código esta realizado en Python, un lenguaje que resulta ideal para el tratamiento de los datos que hemos ido obteniendo gracias a sus funciones y a sus bibliotecas tanto gráficas como matemáticas que nos han permitido un gran abanico de posibilidades a la hora de las simulaciones.

Díaz Romero, O. A., Garavito Romero, M. A. (2020). Modelación y Calibración de la Red de Distribución del Acueducto Urbano del Municipio de Macheta Cundinamarca, Presentan un proyecto que plantea la modelación y calibración del sistema existente, desarrollándose mediante una recolección del catastro de la red actual, para a partir de esto realizar una modelación de diferentes escenarios que permitan observar la principal o principales falencias a las que se está dando lugar y brindar una alternativa de

solución; adicional a esto, conociendo en campo las áreas de expansión urbana que se vienen dando en el municipio con previa aprobación del esquema de ordenamiento territorial, se pretende realizar una ampliación de la red, de manera que se incluyan las zonas donde se proyectan construcciones a un mediano plazo, dichas redes en términos de relatividad de tamaño respecto a la malla existente, no representan cambios altamente significativos, pero si brindan soluciones importantes, por lo que no se plantea la realización de un nuevo diseño, sino que se contemplan las ampliaciones como un conjunto respecto al sistema existente.

El proyecto también aporta de manera significativa a proyectos similares que se deseen desarrollar en municipios y grandes ciudades en lo que se evidencia visualmente la expansión urbana, y la información como resultados aquí consignados en el presente estudio, pueden ser aplicables en otros lugares con problemáticas similares, así como pueden servir de base para futuras investigaciones.

Gamboa Bohórquez, J. A., Rico Rodríguez, J. S. (2020). Elaboración del Modelo Hidráulico para la Red de Distribución de Agua Potable de Funza Cundinamarca Utilizando el Software Epanet, presentan el desarrollo de un proyecto intención de brindar y facilitar al acueducto municipal de Funza, Cundinamarca un modelo digital donde se podrá indicar en que parte del circuito de red hidráulica local se sitúan diferentes datos que no se encuentren acorde a lo establecido por el Gobierno Nacional y así, poder obtener un modelo ideal de acueducto, donde a la población en general se le brinde el servicio adecuado en el suministro de agua potable. A partir del levantamiento de la digitalización del modelo hidráulico para la red de distribución de agua potable de Funza, Cundinamarca utilizando el software EPANET, se obtuvo información desde las diferentes variables que se pueden presentar, generando un modelo que optimiza un control adecuado de la red, donde se tiene en cuenta la carencia de este y los beneficios que este puede traer para el acueducto del municipio.

Gómez Cortés, C. C. (2021). Calibración de redes de distribución de agua potable a través de inteligencia artificial, presenta un trabajo de investigación que tiene como finalidad brindar un método de calibración de modelos computacionales para empresas prestadoras de servicio de agua potable. Para este fin se utilizaron diferentes metodologías de inteligencia artificial para poder comparar sus resultados. La metodología se llevó a cabo por medio del algoritmo EXACTLY, en esta se vincularon los sistemas expertos con las redes neuronales reduciendo los tiempos de ejecución y obteniendo mejores resultados, además, el autor hace énfasis en que el análisis para la instrumentación de redes de distribución de agua potable es necesario para realizar la selección eficiente los elementos instrumentados. Debido a que a través de estas metodologías es posible seleccionar eficientemente los puntos de medición para obtener mejores resultados en el proceso de calibración.

Saldarriaga, J. G., Ochoa, S., Rodríguez, D., and Arbeláez, J. (2009). Water Distribution Network Skeletonization Using the Resilience Concept, presentan en este artículo una metodología que utiliza el concepto de resiliencia para generar modelos esqueletizados o reducidos de Redes de Distribución de Agua (RDA) con un número significativamente menor de tuberías en comparación con el prototipo, pero que aún puede simular, de manera muy precisa, las características hidráulicas y de calidad del agua de la red real. Para este fin, se evaluó el efecto de cada tubería sobre el Índice de Resiliencia de toda la RDA bajo condiciones de diseño hidráulico. Posteriormente se esqueletiza la red retirando de ella aquellas tuberías con el mínimo impacto en el Índice de Resiliencia, asegurando que todos los nodos de consumo sigan conectados. Para garantizar que los parámetros no permanentes de calidad del agua (es decir, cloro residual en los nodos de consumo) del prototipo sean reproducidos adecuadamente por el modelo reducido, se desarrolló una fórmula de corrección para el coeficiente de volumen y de pared, que controla

la descomposición del cloro en la WDN; dependiendo de la distancia de cada tubería al depósito o fuente de suministro, el factor de corrección aplicado a sus coeficientes de volumen y de pared es diferente. La metodología aplicó a tres RDA y los resultados obtenidos son satisfactorios: los modelos esqueletizados son capaces de reproducir el comportamiento hidráulico y el cloro residual de toda la RDA con alta precisión.

Fernández, R., Rodríguez Susa, M. S., Lemus Pérez, M. F., Porras, L. (2023).

Evaluación indicativa del riesgo a la calidad del agua frente a amenazas naturales y antrópicas: el caso de Bogotá (Capítulo 1), presentan en este capítulo 1 del libro “Evaluación indicativa del riesgo a la calidad del agua frente a amenazas naturales y antrópicas: el caso de Bogotá” un modelo para evaluar el riesgo en la calidad de agua potable. El método se aplica como caso de estudio en el sistema de acueducto de agua potable de la ciudad de Bogotá, Colombia, servicio prestado por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB-ESP). Con el modelo se realiza una comparación cualitativa e indicativa de los efectos e impactos de estos eventos amenazantes externos sobre la calidad del agua en el sistema. A partir de los resultados se identificó la distribución geográfica de los riesgos, afectación sobre diferentes componentes del sistema, y alteración de parámetros de calidad del agua. Esta información sirve como base para entender y dimensionar las acciones y prioridades para mitigar este riesgo.

Bonilla Granados, C., Sánchez Tapiero, D., Montoya Martínez, J. (2024).

Confección De Modelos Hidráulicos Y Análisis De Calidad Del Agua En Redes De Distribución Con Qgis, Presentan este artículo debido a la problemática que existe en diferentes ciudades y poblaciones colombianas, sobre empresas o entidades operadores de las redes de distribución no cuentan con modelos matemáticos e hidráulicos que les permitan realizar estos escenarios de análisis. La finalidad de esta investigación el desarrollo de una metodología que permita realizar la confección de los modelos hidráulicos de una red de

distribución de agua potable (RDAP) utilizando complementos informáticos que integren imágenes satelitales de dron y softwares (QGIS y EPANET). Se realizó un caso de aplicación a la RDAP de la zona urbana del municipio de Labateca, Colombia, creando el modelo hidráulico de la red basado en el catastro de la misma. Se creó el modelo hidráulico y se hizo un análisis de calidad del agua evaluando el comportamiento del cloro residual. Por último, se generó una propuesta de sectorización hidráulica para optimizar las presiones del sistema. La sectorización del modelo hidráulico, obtenida mediante el uso de la herramienta computacional QGISRed permitió observar la disminución de las presiones máximas de la RDAP existente, por lo cual, se puede ver la importancia para las empresas prestadoras del servicio la aplicación de metodologías que permitan realizar la confección de modelos hidráulicos.

Bonilla Granados, C. A., Tarazona, L. V., Caicedo, A. D. (2022). Análisis estadístico del consumo de agua potable residencial en Toledo, Colombia, Presentan un estudio que tiene como finalidad realizar un análisis estadístico del consumo de agua potable residencial en Toledo, Colombia. Se emplean los registros tomados por la empresa de distribución de agua potable y los reportes realizados durante cada mes en el año 2021. El análisis previsto se realizó agrupando los registros existentes por estratos socioeconómicos y se logró determinar el consumo promedio mensual por suscriptor de carácter residencial. Se realizó un análisis estadístico descriptivo y se empleó el software SPSS. Los resultados obtenidos muestran que el consumo mensual promedio en los estratos 1, 2 y 3 fue similar durante el año de análisis con un gasto de 13 metros cúbicos (m³) y en el estrato 4 el consumo fue de 9 m³. Se estimaron las barras de error basadas en un nivel de confianza de 95 % y se realizó la prueba de bondad y ajuste de Kolmogórov-Smirnov para cada estrato socioeconómico y se comparó la función de distribución acumulada observada en los datos estudiados. Finalmente se realizó un análisis

comparativo de los consumos calculados y los valores recomendados con la normativa vigente en Colombia y se determinó que los valores calculados para Toledo se encuentran por debajo del gasto máximo establecido por la normativa el cuál es 15.6 m3.

Ramírez Torres, Y. P. (2019). Lenguaje de Programación (Python) y Software de diseño (Epanet) para la Modelación y Simulación de Redes de Distribución de Agua Potable, presenta un trabajo de investigación que tiene como finalidad la implementación de los softwares Python y Epanet con el fin de optimizar el tiempo de la simulación y modelación de una red de distribución de agua potable. Para este fin se realizó un análisis de diferentes factores que fueron significativos en el momento de la simulación, estableciendo soluciones que permitieron mejorar los tiempos de cálculos y asimismo obtener resultados importantes como nodos con presiones negativas, velocidades en las tuberías, comportamiento de la curva de consumo en un periodo extendido, entre otras propiedades hidráulicas de la red. Lo anterior se llevó a cabo por medio del aprendizaje del lenguaje de programación Python, con el objeto de efectuar su interfaz enlazándola por medio de algoritmos con Epanet, en consecuencia, se mejoraron los resultados que este nos ofrece debido a que el software de simulación es por excelencia un programa que proporciona un entorno integral."

Sánchez Tapiero, D. I. (2017). Diseño Implementado Con Herramientas Tecnológica De Las Redes De Acueducto Y Alcantarillado Sanitario Del Asentamiento José Bernal Municipio De Cúcuta Norte De Santander, Presenta un trabajo de grado que tiene como finalidad el diseño de la red de acueducto y alcantarillado del asentamiento José Bernal de la ciudad de Cúcuta Norte de Santander, con el fin de disminuir la brecha en acceso al agua potable y saneamiento básico. Para este fin se realizó la entrega de planos de diseños para la construcción del mismo, pero para ello, previamente se tuvo que realizar el levantamiento topográfico, diseño de la red de

acueducto, diseño del alcantarillado, montaje de las redes al sistema de información geográfica y presupuesto total de la obra. La red de acueducto del asentamiento es alimentada por el fluido proveniente por la planta de tratamiento distribuyendo el fluido y suministrando la red interna. La red de alcantarillado se realizó en base a la normativa colombiana y las aguas residuales se transportan a dos puntos de entrega. Luego de obtener los diseños, las redes se exportaron a ArcGIS para hacer el debido proceso de georreferenciación en el catastro de redes, para la realización de consultas rápidas, ya que cuenta con toda la información importante de los diseños. Por último, se presentó el costo total de obra para la red de acueducto y alcantarillado.

Flórez Sepúlveda, A. L., Bonilla Granados, C. A., Celeita Molina, J. (2023).
Análisis de sectorización hidráulica en redes de distribución de agua implementando Epanet e iDistritos, Presentan una investigación que tiene como finalidad presentar una propuesta de mejora y optimización de las redes hidráulicas de la ciudad de Los Patios, ubicada en Norte de Santander, Colombia. Ciudad que actualmente presenta problemas en el funcionamiento de su sistema de distribución debido a factores como el crecimiento poblacional, los asentamientos informales, la falta de planeación en la construcción de sus redes de tuberías y la disponibilidad de agua en la fuente de abastecimiento. La operación actual de la red se realiza a partir del cierre de válvulas de seccionamiento con el fin de generar sectores y de esta forma garantizar turnos de servicio que proporcionan agua por zonas entre dos a tres días por la semana, lo cual incumple con los criterios de continuidad del servicio y afecta la calidad del recurso; en respuesta a esta problemática, para este fin se proponen varias alternativas de sectorización hidráulica de las redes de tuberías analizando las características de conectividad de sus nodos, empleando la teoría de grafos y los softwares iDistritos y Epanet. Como resultado se obtuvo una optimización del funcionamiento hidráulico de la red aumentando la continuidad del servicio.

2.2.Marco Teórico

A continuación, se describen y contextualizan los elementos teóricos que sustentan el desarrollo de esta investigación. La teoría se centra en los conceptos técnicos y las bases matemáticas que utiliza el paquete Water Network Tool for Resilience (WNTR) para modelar y analizar sistemas de redes a presión.

2.2.1. Ecuaciones fundamentales.

Ecuación de continuidad en un nodo

La ecuación enunciada de la siguiente manera: “La suma algebraica de los caudales másicos (o volumétricos, ya que el fluido es incompresible) que confluyen en el nodo debe ser igual a cero en el caso de no existir pérdidas o igual a las pérdidas en cada nodo de haberlas”. (García, 2006).

Matemáticamente se expresa como:

ecuación 1

$$\sum_{j=1}^{nt_i} Q_{ij} = C_i$$

Donde:

- Q_{ij} : Caudal que circula en la línea que une el nodo i al j .
- nt_i : Número total de líneas que convergen en el nodo i .
- C_i : Caudal de alimentación o consumo en el nodo i .

Ecuación de Bernoulli

La ecuación enunciada de la siguiente manera: “la energía por unidad de peso del fluido en la sección aguas arriba E_1 , más la energía por unidad de peso cedida al mismo a través de elementos activos, tales como bombas h_b en el trayecto de 1 a 2 es igual a la energía por unidad de peso en la sección aguas abajo E_2 más las pérdidas de energía por unidad de peso entre las secciones 1 y 2, h_{1-2} ”. (García, 2006).

Matemáticamente se expresa como:

ecuación 2

$$E_1 + h_b = E_2 + h_{1-2}$$

La energía por unidad de peso en una determinada sección consta de tres componentes:

$$E = \frac{P}{\gamma} + z + \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

- $\frac{P}{\gamma}$: Altura de presión.
- z : Cota geométrica.
- $\frac{v^2}{2g}$: Altura cinética.

Ecuación de Hazen- Williams

La ecuación de Hazen-Williams es ampliamente utilizada por ser una fórmula empírica sencilla y de fácil cálculo. Su principal ventaja es que el coeficiente de rugosidad C no varía en función de la velocidad del flujo ni del diámetro de la tubería. La aplicación de la fórmula es adecuada solo para la operación de tuberías en regímenes laminar o de transición. (Yepes , 2023)

Matemáticamente se expresa como:

ecuación 3

$$h = 10,674 * \left(\frac{Q^{1,852}}{C^{1,852} * D^{4,87}} \right) * L$$

Donde:

- h = Pérdida de carga o de energía (m).
- Q = Caudal (m^3/s).
- C = Coeficiente de rugosidad (adimensional).
- D = Diámetro interno de la tubería (m).
- L = Longitud de la tubería (m).

Ecuación de Darcy-Weisbach

La ecuación de Darcy-Weisbach es una fórmula general utilizada para calcular la pérdida de energía o pérdida de carga en tuberías circulares bajo flujo a presión. Esta ecuación se deriva de las leyes del movimiento de Newton y fue desarrollada por Henry Darcy a partir de experimentos que involucraron tuberías con diámetros que oscilaban entre 0.0122 m y 0.5 m. Los materiales de las tuberías en sus experimentos incluyeron vidrio, hierro, plomo, entre otros. Puede aplicarse a cualquier tipo de fluido y régimen de flujo laminar, transitorio y turbulento. (Saldarriaga, Hidráulica de tuberías abastecimiento de agua, redes, riego, 2007).

Matemáticamente se expresa como:

ecuación 4

$$hf = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

- hf = Pérdida de carga por fricción (m).
- f = Factor de fricción de Darcy (adimensional).
- L = Longitud de la tubería (m).
- D = Diámetro de la tubería (m).
- V = Velocidad del fluido en la tubería.
- g = Aceleración debido a la gravedad.

Método del Gradiente Hidráulico

Desarrollado por Todini y Pilati en forma definitiva en 1987, Combina las ecuaciones de energía para cada tubo con las ecuaciones de continuidad en cada unión. Permite solución simultánea de caudales en las tuberías y alturas piezométricas en los nodos. Se basa en métodos de álgebra lineal numérica.

El gradiente hidráulico i se define como la pérdida de energía experimentada por unidad de longitud recorrida por el agua; es decir, representa la pérdida o cambio de potencial hidráulico por unidad de longitud, medida en el sentido del flujo de agua.

Matemáticamente se expresa como:

ecuación 5

$$i = \frac{Ah}{L}$$

Donde:

- i = Gradiente Hidráulico.
- Ah = Diferencia de potencial entre dos puntos del acuífero ($ht_1 - ht_2$).
- L = Distancia en la dirección del flujo entre dos puntos.

2.2.2. Resiliencia

La resiliencia es la capacidad de una red de distribución de agua potable para sobreponerse a condiciones de estrés o fallos, garantizando la continuidad del suministro de agua a los usuarios. (Todini, 2000).

Índice de Resiliencia de Todini

El índice de Todini está relacionado con la capacidad de un sistema para superar fallas y al mismo tiempo satisfacer las demandas y presiones en los nodos. El índice de Todini define la resiliencia en un momento específico como una medida del excedente de energía en cada nodo. (Manual WNTR, 2023).

López (2020) describe el Índice de Resiliencia (RI) formulado por Todini (2000) como “la relación entre el excedente de energía en los nudos de demanda y la energía disponible en cabecera. El estado de falla del sistema ocurre cuando la altura disponible en los nudos de demanda no puede alcanzar el umbral mínimo requerido. Este indicador de tipo determinista puede tomar valores entre cero y uno ($0 \leq RI \leq 1$)”.

Nirmal Jayaram y K. Srinivasan (2008) expresan que este índice funciona bien en redes con una sola fuente, ya que la potencia total de entrada es constante y solo depende de la red y las demandas. Sin embargo, en redes con múltiples fuentes, la redistribución de los caudales entre fuentes afecta la potencia total de entrada, lo que puede hacer que redes con mejor desempeño tengan valores de resiliencia más bajos debido a un aumento en la potencia total lo que distorsiona la evaluación de la resiliencia.

Según Cortés (2015), una red se considera resiliente siempre que el índice sea mayor a cero punto cinco (0.5).

Matemáticamente se expresa como:

ecuación 6

$$I_r = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^{N_{inst}} D_{i,t} \cdot (H_{i,t} - H_{i,t}^{(req)})}{\sum_{k=1}^R \sum_{t=0}^{N_{inst}} D_{out_{k,t}} \cdot H_{k,t} + \sum_{j=1}^P \sum_{t=0}^{N_{inst}} \left(\frac{P_{j,t}}{\gamma} \right) - \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^{N_{inst}} D_{i,t} \cdot H_{i,t}^{(req)}}$$

De esta expresión, $P_{j,t}$ corresponde a la energía suministrada por el grupo de bombeo, que viene dado por la siguiente expresión:

$$P_{j,t} = \frac{\gamma \cdot Q_{j,t} \cdot H_{j,t}}{\eta_{j,t}}$$

Donde:

- N_{inst} = Total de instantes de tiempo durante los cuales se realiza el análisis o la simulación.
- R = Conjunto de nodos origen o fuentes.
- P = Conjunto de bombas.
- $D_{i,t}$ = Demanda del nodo de consumo i en el instante t .
- $H_{i,t}$ = Cabeza calculada en el nodo de consumo i en el instante t .
- $H_{i,t}^{(req)}$ = Cabeza mínima requerida en el nodo de consumo i para el instante t .
- $D_{out_{k,t}}$ = Flujo total que suministra el nodo origen k en el instante t
- $H_{k,t}$ = Cabeza en el nodo origen k en el instante t .
- γ = Peso específico del fluido.
- $Q_{j,t}$ = Caudal que bombeado por el grupo de bombeo j en el instante t .
- $H_{j,t}$ = Cabeza aportada por el grupo de bombeo j para el instante t .
- $\eta_{j,t}$ = Rendimiento del grupo de bombeo j en el instante t .

Índice de Resiliencia Modificado

Nirmal Jayaram y K. Srinivasan (2008) modifican el índice de resiliencia original propuesto por Todini (2000) para superar algunas limitaciones del modelo inicial, especialmente en el caso de redes de distribución de agua que cuentan con múltiples fuentes, bombas y tanques.

El índice de resiliencia modificado (MRI o MIr) se define como el porcentaje de energía excedente disponible en los nodos de demanda en relación con la energía mínima necesaria para satisfacer las demandas y se basa en el concepto de proporcionar energía excedente en los nodos más allá de la mínima requerida. Mientras que el índice original de Todini puede tomar valores entre 0 y 1, el índice modificado se presenta en forma de porcentaje, lo que permite una

interpretación directa: un valor de MI_r igual a $X\%$ indica que la energía en los nodos de demanda excede en $X\%$ la energía mínima requerida.

Matemáticamente se expresa como:

ecuación 7

$$MI_r = \frac{\sum_{j=1}^{nn} Q_j^{req} (H_j - H_{min,j})}{\sum_{j=1}^{nn} Q_j^{req} \cdot H_{min,j}} \times 100$$

Donde:

Q_j^{req} = Demanda requerida en el nodo de consumo j .

H_j = Cabeza calculada en el nodo de consumo j .

$H_{min,j}$ = Cabeza mínima requerida en el nodo de consumo j .

2.3.Marco Conceptual

A continuación, se presentan la recopilación de distintos conceptos pertinentes y fundamentales relacionadas al tema que abarca esta propuesta:

2.3.1. Red de distribución de agua

Es un sistema conformado por elementos tales como tubería, bombas, válvulas, entre otros, que tiene como función la conducción del agua desde los tanques de servicio o distribución hasta las tomas domiciliarias. Su objetivo es proporcionar el abastecimiento de agua eficiente a los suscriptores para los diferentes usos tales como el doméstico, comercial, industrial, entre otros. “La red debe proporcionar este servicio todo el tiempo, en cantidad suficiente, con la calidad requerida y a una presión adecuada”. (PLINCO, 2019).

Teniendo en cuenta la topología de las redes podremos clasificar las mismas en 3 grupos diferenciados:

- **Red Ramificada:** De forma arborescente, se caracterizan porque el agua tiene un único trayecto desde el punto de abastecimiento al punto de consumo. Es el caso de las redes de regadío. Para conocer el caudal que circula por una línea sólo es necesario aplicar la

ecuación de continuidad en cada nudo, junto con la ecuación de la energía. Éstas pueden resultar poco compensadas, obteniéndose la solución a través de un cálculo directo, ya que en los puntos más alejados de la red las presiones son menores. También presentan problemas de calidad al estancarse el agua. (García, 2006).

- **Red mallada:** Están compuestas por circuitos cerrados formados por varias líneas. Nos ofrecen mayor garantía que las redes ramificadas, ya que el agua tiene distintos caminos para llegar al punto de consumo. Así mismo las presiones tienden a auto equilibrarse sin necesidad de infraestructuras. No pueden calcularse únicamente por la ecuación de continuidad, de modo que la determinación de caudales es más compleja, lo que hace imprescindible tenerlas modelizadas. (García, 2006).
- **Red mixta:** Son las más comunes. Presentan mallas conectando las arterias principales y ramificaciones en las tuberías secundarias que llevan el agua al consumidor. (García, 2006).
- **Modelación:** La modelación, es una herramienta, creada con el propósito de imitar el objeto que se desea estudiar, este modelo puede ser un instrumento teórico o material. Lo que pretende en sí, es sintetizar una realidad, que permita descubrir, ciertas cualidades y relaciones del objeto de estudio. A su vez, el modelo es considerado un elemento intermedio entre el sujeto y el objeto de investigación. (Pérez, G., García, G., Nocado de León, I., & García, L, 1996).
- **Simulación:** La simulación es el proceso de crear y desarrollar un modelo computarizado de un sistema, con el fin de conducir experimentos con tal modelo; el propósito de éste es el de entender el comportamiento del sistema, además de evaluar las varias mentas con las cuales puede operar dicho sistema. (Robert, E Shannon, 1988).
- **Modelo Hidráulico:** El modelo hidráulico es una reproducción de la realidad, a escala reducida, este modelo incluye: estados, fenómenos y procesos importantes en el flujo

del agua, por otra parte, en su estructura, también debe incluir ciertas magnitudes o hidrodinámicas, que pertenezcan y correspondan a las magnitudes en la naturaleza. (Hidalgo y Poveda, 2012).

2.3.2. *Representación física de la red*

Líneas

- **Tuberías a presión:** Se define por estar compuesta por 2 o más tubos ensamblados de tal forma que permita la circulación del fluido que estamos tratando. Por la tubería circula el agua del punto de mayor presión hacia el de menor presión, están llenas en todo momento. En el recorrido de la tubería se suelen incorporar válvulas de corte o antirretorno. Es el entramado de la tubería existen pérdidas de carga que estudiaremos con detalle más adelante. (Villagrán, 2018).
- **Bombas:** Reciben energía con el fin de elevar la carga de presión del agua para que esta fluya por la tubería. Muchos de sistemas de distribución de agua incorporan bombas en el sistema para trasladar el agua o mantener presiones que sean requeridas en diversos tramos. (Villagrán, 2018).
- **Válvulas:** Son dispositivos con la función de detener, iniciar o controlar las características del flujo dentro de los conductos de presión, se utilizan para regular el caudal y la presión. Los podemos encontrar dependiendo de la manera en que se accionen de diversos tipos como manuales, automáticos o semiautomático. (Villagrán, 2018).
- **Accesorios:** La pérdida de carga que introducen se modela modificando las características de la tubería donde van alojados, mediante su coeficiente de pérdidas. (García, 2006).

Nodos

Se representan como nodos los siguientes componentes:

- **Conexiones:** Son puntos en la red donde se unen las líneas o por donde entra o sale el agua de la red. Importante a la hora de simular nuestra red, ya que son puntos donde se conecta la red interior con la exterior y pueden existir demandas que varíaran o no con el tiempo dependiendo de las características de esta. (Villagrán, 2018).
- **Reservorios:** Son sitios donde se acumula el agua como lagos, embalses, acuíferos... en Epanet los trataremos como si fuesen fuentes infinitas de agua o como sumidero para el sistema. (Villagrán, 2018).
- **Tanques:** Este tipo de elemento al contrario que los reservorios no se muestran como sumideros o depósitos infinitos, sino que las acciones que se toman dentro de la red de distribución afectaran a este sistema. Representan un objeto con capacidad de almacenamiento del líquido que tendrá un volumen determinado y la altura de este dentro del tanque evoluciona en función del tiempo. (Villagrán, 2018).

2.3.3. *Componentes no físicos de la red*

Además de los componentes ya definidos, existen componentes no físicos para describir el comportamiento y modo de operación del sistema. Estos son:

- **Curvas de Comportamiento:** Representan la relación entre dos magnitudes. Son el caso de curvas características (altura-caudal), de rendimiento (rendimiento en %-caudal), de cubicación de embalses (volumen-caudal) o de pérdidas en válvulas de propósito general (pérdidas-caudal). (García, 2006).
- **Patrón de demanda:** Se utiliza para variar el comportamiento de los caudales de demanda en las conexiones o nudos en función del tiempo. A esta particularidad se le conoce con el nombre de simulación en período extendido; según (Solórzano, 2017) el período extendido es el caso de un modelo real para una red de acueducto, dado que la población que es abastecida tiende a tener diferentes demandas en el día.

2.3.4. *Temporalidad a la hora de la modelación*

- **Simulación en periodo simple:** Los consumos en nudos, la piezometría y las características de los elementos de regulación no sufren alteraciones a lo largo del tiempo. (García, 2006).
- **Simulación en periodo extendido:** La variable tiempo se considera explícitamente. En todo caso considera que los tiempos de maniobra son muy superiores a los tiempos de viaje de las ondas de forma que no existe golpe de ariete. (García, 2006).

2.3.5. *Magnitudes*

- **Presión:** Es la magnitud física que expresa la fuerza ejercida por un cuerpo por unidad de superficie. En hidráulica esta magnitud se mide en metros por columna de agua (m.c.a.), unidades que expresan la presión ejercida por una columna de agua de 1 metro de altura. (Robles, 2018).
- **Pérdida de carga:** Es un parámetro fundamental en el diseño de la red. Las pérdidas de carga representan las pérdidas de energía del agua a medida que ésta atraviesa la red, lo que resulta en suministros con presiones más bajas. Las pérdidas principales se deben al rozamiento del agua con las paredes de las tuberías, existiendo también pérdidas ocasionadas por elementos puntuales de la red. Alguno de los factores que determinan las pérdidas lineales son la rugosidad y el diámetro de la tubería. (Robles, 2018).
- **Velocidad del agua:** La velocidad es un parámetro que debe ser controlado en la red. Velocidades demasiado altas pueden conllevar a desgaste excesivo o incluso rotura de tuberías, mientras que velocidades muy bajas ocasionan el estancamiento del agua y, por ello, la pérdida de calidad de esta. (Robles, 2018).
- **Caudal:** Es la cantidad de agua que atraviesa una sección por unidad de tiempo. El caudal en los diferentes tramos de la red está condicionado a la cantidad de demanda

de los nodos consumidores, siendo en general una premisa satisfacer dicha demanda. (Robles, 2018).

- **Demanda:** La demanda de agua estimada corresponde a la cantidad o volumen de agua utilizada por los sectores económicos y la población. (Minambiente, 2024)
- **Diámetros:** Los diámetros de las tuberías están acotados a ciertos valores de una gama comercial que depende del material. La elección de los diámetros depende de diversos factores una vez que éstos influyen en los costes de instalación y utilización del sistema, así como en las presiones de los nodos consumidores. (Robles, 2018).

2.3.6. *Epanet*

Epanet es un programa de cálculo de redes con una interfaz muy visual y un funcionamiento intuitivo que difunde la Agencia Norteamericana de Medioambiente, (EPA).

Es un simulador en para redes hidráulicas a presión compuesto por un módulo de análisis hidráulico que permite simular el comportamiento de la red bajo determinadas leyes de operación. (Molina, 2011).

Epanet es un programa informático que realiza una simulación de período extendido del comportamiento hidráulico y de calidad del agua dentro de las redes de tuberías presurizadas. Una red consta de tuberías, nodos (uniones de tuberías), bombas, válvulas y tanques de almacenamiento o depósitos. Epanet rastrea el flujo de agua en cada tubería, la presión en cada nodo, la altura del agua en cada tanque y la concentración de una especie química en toda la red durante un período de simulación compuesto por múltiples pasos de tiempo. Además de las especies químicas, la edad del agua y el rastreo de la fuente también se pueden simular. (Manual Epanet, 2022).

Epanet está diseñada para ser una herramienta de investigación para mejorar nuestra comprensión del movimiento y el destino de los componentes del agua potable dentro de los sistemas de distribución. Se puede utilizar para muchos tipos diferentes de aplicaciones en el

análisis de sistemas de distribución. El diseño del programa de muestreo, la calibración del modelo hidráulico, el análisis residual de cloro y la evaluación de la exposición al consumidor son algunos ejemplos. (Manual Epanet, 2022).

2.3.7. Python

Python es un lenguaje de programación de gran capacidad, su mayor interés recae en la gran variedad de paquetes que contiene y las funciones incorporadas en el propio lenguaje, además su filosofía provee una sintaxis de fácil lectura. Posee licencia de código abierto, es decir, es gratuito. Es un lenguaje interpretado, no necesita compilar el código fuente para poder interpretarlo. (Python software foundation, 2024).

Python puede trabajar sin entorno de desarrollo, no obstante, es más fácil utilizar un entorno que analiza el código advirtiéndolo de posibles fallos en el mismo, además, permite localizar errores fácilmente. (Robles, 2018).

- **IDE:** Un IDE o entorno de desarrollo integrado es una aplicación de tipo software que combina en un solo lugar todas las herramientas necesarias para realizar un proyecto de desarrollo de software. (DataScientest, 2024)
- **Paquete:** Un paquete en Python no es más que un código que almacena variables, métodos, clases y atributos y realiza funciones específicas. Por sencillez, se llamará librería a la librería estándar de Python y paquete al resto de librerías. (Robles, 2018). Existen muchas librerías muy útiles que son utilizadas para el procesamiento y análisis de datos que sirven para la resolución de problemas complejos de toda índole.

2.3.8. Amenazas en las redes de distribución de agua potable

Los sistemas de agua potable se enfrentan a múltiples desafíos, como el envejecimiento de la infraestructura, los problemas de calidad del agua, la incertidumbre en la oferta y la demanda, los desastres naturales, las emergencias ambientales y los ataques cibernéticos y terroristas. Todos estos factores pueden interrumpir gran parte del sistema hídrico, causando

daños a la infraestructura e interrupciones del suministro a los usuarios. Aumentar la resiliencia ante este tipo de riesgos es esencial para mejorar la seguridad hídrica. (Manual WNTR, 2023)

Las amenazas producto de fenómenos naturales pueden afectar a una parte significativa del sistema. No obstante, la extensión e intensidad del daño se encuentra íntimamente relacionada a la probabilidad de ocurrencia del fenómeno que conduce al daño. Las amenazas de origen natural como los riesgos hidrológicos extremos (sequías e inundaciones), terremotos, entre otros, han sido estudiados durante muchas décadas, por lo cual existe suficiente información disponible para poder determinar la probabilidad de ocurrencia y valorar el daño producido, lo que permite poseer una buena estimación del riesgo (López, 2020).

Poder predecir el rendimiento de los sistemas de agua potable durante incidentes disruptivos y comprender cómo absorberlos, recuperarse y adaptarse mejor a ellos puede contribuir a mejorar la resiliencia. Las herramientas de simulación y análisis pueden ayudar a las empresas de agua a explorar la capacidad de sus sistemas para gestionar incidentes disruptivos y guiar la planificación necesaria para que los sistemas sean más resilientes a lo largo del tiempo (EPA, 2015)

2.3.9. *Water Network Tool for Resilience (WNTR)*

Water Network Tool for Resilience (WNTR) es un paquete de Python diseñado para simular y analizar la resiliencia de las redes de distribución de agua. Aquí, una red se refiere a la recolección de tuberías, bombas, válvulas, uniones, tanques y depósitos que forman un sistema de distribución de agua. WNTR tiene una interfaz de programación de aplicaciones (API) que es flexible y permite cambios en la estructura y operaciones de la red, junto con la simulación de incidentes disruptivos y acciones de recuperación. (Manual WNTR, 2023).

WNTR se basa en Epanet, que es una herramienta para simular el movimiento y el destino de los componentes del agua potable dentro de los sistemas de distribución. (Manual WNTR, 2023).

WNTR incluye capacidades para:

- Generar modelos de redes hídricas desde cero o a partir de archivos de entrada de modelos de redes hídricas con formato EPANET (EPANET INP).
- Modificar el funcionamiento de la red modificando las condiciones iniciales, la configuración de los componentes, la oferta y la demanda, y los controles temporales y condicionales.
- Simular la hidráulica de la red con el simulador Epanet y simular escenarios disruptivos con el simulador WNTR.
- Incorporar estrategias de respuesta, reparación y mitigación, como la reparación de fugas y la generación de energía de respaldo.
- Calcular la resiliencia utilizando métricas como el Índice de Todini y el Índice de Resiliencia Modificado.
- Analizar los resultados y generar gráficos.

2.4.Marco Legal

A continuación, se presenta el marco legal que rige este trabajo. Este se compone, en primera instancia, del Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) de Colombia, que establece los lineamientos normativos aplicables a los sistemas de agua potable y saneamiento; las metas globales adoptadas por las Naciones Unidas en la Agenda 2030 de desarrollo sostenible, que orientan la gestión sostenible del recurso hídrico a nivel mundial, y, por último, la licencia de uso del paquete PyQt5, empleado en el desarrollo de la interfaz gráfica del entorno de modelación hidráulica..

2.4.1. Resolución No. 0330 de 8 de junio de 2017

“Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1147 de 2005 y 2320 de 2009”. (Ministerio de vivienda, 2017).

Artículo 1. Objeto. La resolución reglamenta los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de planeación y diseño, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo.

Artículo 57. Modelación de redes de distribución de agua. Todos los sistemas de redes de distribución deben contar con un modelo hidráulico, a través del cual se pueda predecir el comportamiento frente a diferentes condiciones operativas, de mantenimiento o de expansión.

2.4.2. Resolución No. 799 de 9 de diciembre de 2021

“Por la cual se modifica la Resolución 0330 de 2017”

Que, en el marco de la implementación del reglamento técnico, se ha identificado la necesidad de ajustar algunas disposiciones contenidas en la Resolución 330 de 2017 con el objetivo de brindar mayor claridad en su aplicación. (Ministerio de Vivienda, 2021)

Artículo 58. Sectorización Hidráulica. Todas las redes deben estar sectorizadas con el fin de lograr la racionalización del servicio. El diseño de la sectorización debe estar basado en los resultados obtenidos en la modelación hidráulica, en la cual se establezcan los límites mínimos y máximos de presiones para garantizar el correcto funcionamiento del sistema. Cada sector de la red se debe encontrar definido y aislado hidráulicamente de otros sectores.

2.4.3. Objetivos de desarrollo sostenible

ODS 6: Agua limpia y saneamiento. Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos. Este objetivo incluye el acceso universal a agua potable segura y asequible, el saneamiento adecuado y la higiene, y la reducción de la contaminación de las fuentes hídricas. También promueve una gestión eficiente del agua, la protección de los ecosistemas relacionados con el agua, y la participación comunitaria en la mejora de los servicios.

ODS 9: Industria, innovación e infraestructura. Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación. Este objetivo impulsa el acceso universal a oportunidades económicas mediante industrias inclusivas, avances tecnológicos y una gestión eficiente. Busca reducir desigualdades, fortalecer la resiliencia de las infraestructuras y apoyar el crecimiento sostenido, protegiendo los ecosistemas y promoviendo la participación global en el desarrollo.

ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles. Lograr que las ciudades y comunidades sean inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles. Este objetivo abarca la mejora del acceso a viviendas y servicios básicos, la reducción de la contaminación ambiental y los residuos urbanos, y la planificación urbana que priorice la sostenibilidad y la resiliencia ante desastres. También promueve la preservación del patrimonio cultural y natural, y la participación ciudadana en la geografía.

2.4.4. Licencia de uso del paquete PyQt5

El entorno de modelación hidráulica desarrollado en este trabajo utiliza PyQt5, una biblioteca de código abierto para la creación de interfaces gráficas en Python.

PyQt5 está licenciado bajo la GNU Lesser General Public License (LGPL) v2.1, publicada por la Free Software Foundation en febrero de 1999. Esta licencia permite el uso, modificación y distribución de la biblioteca, siempre que se cumplan sus condiciones, entre ellas:

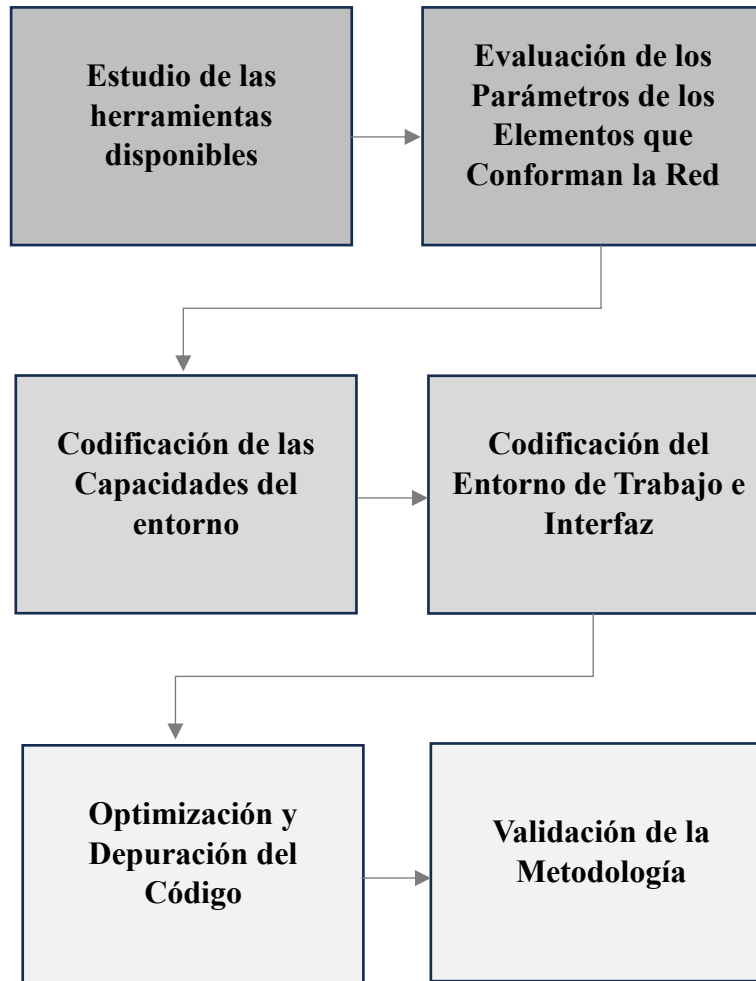
- Permitir el acceso al código fuente de PyQt5 en caso de distribución.
- No imponer restricciones adicionales sobre los derechos otorgados por la LGPL.

En este proyecto, PyQt5 se emplea como una dependencia externa, instalada mediante el gestor de paquetes de Python (`pip install PyQt5`). No se distribuye directamente con el código desarrollado, por lo que los usuarios que deseen ejecutar el programa deberán instalar PyQt5 por su cuenta, conforme a los términos de la LGPL v2.1. El código fuente de PyQt5 y los

detalles de su licencia están disponibles en el sitio oficial de Riverbank Computing (<https://www.riverbankcomputing.com/static/Docs/PyQt5/>) y en el repositorio correspondiente.

3. METODOLOGÍA

La metodología empleada en este trabajo se estructuró en varias etapas que abarcan desde la investigación inicial hasta la validación final del entorno desarrollado: En la primera etapa, se realizó la búsqueda y estudio de los paquetes necesarios tanto para la modelación y simulación de redes de distribución de agua potable, como para la codificación del entorno en el cual se ejecutarán todos los procesos; en la segunda etapa, se definieron los parámetros esenciales para representar correctamente los elementos de la red y modelar su comportamiento y características; en la tercera etapa, se procedió a codificar cada uno de los algoritmos principales del entorno, utilizando los paquetes seleccionados y conforme a la normativa vigente; en la cuarta etapa, se diseñó y codificó la interfaz gráfica de usuario (GUI), organizando las distintas funciones del entorno para su interacción con el usuario; la quinta etapa estuvo dedicada a la depuración del código, corrigiendo errores y ajustando el rendimiento del sistema para garantizar su funcionamiento adecuado. Finalmente, en la sexta etapa, se evaluó el desempeño del entorno comparando los resultados obtenidos con los generados por el software EPANET, visualizando las simulaciones a través de gráficos y datos para validar la precisión y fiabilidad de la herramienta. En la figura 1 se esquematizan todas las etapas de la metodología.

Figura 1.*Diagrama de las Etapas de la Metodología*

Nota: Paso a paso de las etapas desarrolladas en la metodología.

3.1. Estudio de las herramientas disponibles

El desarrollo del entorno de modelación hidráulica se llevó a cabo utilizando herramientas de Python seleccionadas por su capacidad para cumplir con los requerimientos del proyecto. Para ello, se evaluaron diversas opciones en términos de funcionalidad, compatibilidad y eficiencia en el procesamiento de datos y simulaciones.

Entre los entornos de desarrollo evaluados, se optó por Spyder, un IDE diseñado para aplicaciones científicas e ingenieriles. Su uso facilitó la implementación de código gracias a su consola interactiva, herramientas de depuración y compatibilidad con diversos paquetes de Python.

En cuanto a los paquetes de programación, se seleccionaron WNTR, Pandas, Matplotlib y PyQt5, debido a su idoneidad para cada fase del desarrollo, abarcando modelación hidráulica, análisis de datos, visualización de resultados e interacción con el usuario.

3.1.1. *Water Network Tool for Resilience (WNTR)*

Se utilizó WNTR para desarrollar algoritmos enfocados en la modelación hidráulica, diseño, simulación de eventos disruptivos y análisis de resiliencia en redes de distribución de agua potable.

3.1.2. *Pandas*

El procesamiento y análisis de datos se realizó con pandas, empleando estructuras optimizadas para organizar y manipular la información obtenida en las simulaciones de manera tabular.

3.1.3. *Matplotlib*

Para la visualización de resultados, se utilizó Matplotlib, con herramientas para representar gráficamente la estructura de la red y los resultados de las simulaciones por medio de gráficas de series de tiempo, de barras y boxplot.

3.1.4. *PyQt5*

Finalmente, para la construcción de la interfaz gráfica, se empleó PyQt5, desarrollando una ventana principal que integra los módulos, opciones y configuraciones necesarias para la modelación hidráulica de las redes, permitiendo de manera intuitiva acceder a cada una de las funcionalidades que ofrece la herramienta.

3.2. Evaluación de los parámetros de los elementos que conforman la red

La evaluación de los parámetros hidráulicos fue una etapa clave en el desarrollo del entorno de modelación, ya que estos definen el comportamiento y la operación de la red de distribución. Se realizó un análisis exhaustivo de los valores predeterminados en WNTR,

garantizando la coherencia con las normativas y condiciones reales de operación. Para ello, se implementó un proceso de validación en el que:

Se verificaron las unidades de trabajo, WNTR opera en el Sistema Internacional de Unidades (SI). Se revisó que los parámetros predeterminados como lo son presión, velocidades y otras magnitudes estuvieran en unidades métricas. En la visualización de datos, se realizaron conversiones para facilitar la interpretación, como la transformación de metros cúbicos por segundo (m^3/s) a litros por segundo (LPS). En la tabla 1 se presentan las unidades internas con las que trabaja el paquete WNTR:

Tabla 1.

Unidades en Sistema Internacional

Parámetro	Unidad en SI
Aceleración	g ($g = 9.80665 \frac{m}{s^2}$)
Demanda	$\frac{m^3}{s}$
Diámetro	m
Elevación	m
Energía	J
Caudal	$\frac{m^3}{s}$
Longitud	m
Potencia	W
Altura de presión	m (fluido de densidad $1000 \frac{kg}{m^3}$)
Tiempo	s
Velocidad	$\frac{m}{s}$
Volumen	m^3

Nota: Unidades en Sistema Internacional empleadas por el paquete WNTR

Todos los cálculos se realizaron con base en estas unidades. Sin embargo, para la representación del caudal y el volumen, expresados en metros cúbicos por segundo ($\frac{m^3}{s}$) y metros cúbicos (m^3), respectivamente, en la generación de las gráficas y datos tabulares, las unidades fueron convertidas a litros por segundo (LPS) para una mayor interpretación de los datos.

Se analizaron y ajustaron los valores predeterminados al revisar los parámetros asociados a los elementos de la red, como nodos, tuberías, bombas y válvulas, asegurando que reflejaran condiciones realistas. Se compararon con valores típicos utilizados en diseño hidráulico y, en caso necesario, se ajustaron para mejorar la precisión del modelo.

Se implementaron pruebas de consistencia desarrollando scripts en Python para evaluar la coherencia entre parámetros interdependientes, como diámetros de tuberías, caudales y niveles de tanque. Estas pruebas permitieron detectar y corregir posibles inconsistencias antes de realizar simulaciones.

3.3.Codificación de las capacidades del entorno

La codificación de las capacidades del entorno constituyó la etapa central del proyecto, en la que se desarrollaron los algoritmos y estructuras necesarias para integrar las funcionalidades de WNTR y otras herramientas utilizadas en la modelación de redes de distribución de agua potable.

Para lograrlo, se implementó una arquitectura modular basada en programación orientada a objetos (POO), lo que permitió una mejor organización del código y una integración más sencilla con la interfaz gráfica.

En total, se desarrollaron 13 clases, organizadas en 11 clases principales y 2 clases auxiliares.

3.3.1. Clases Principales

A continuación, se describen las clases que conforman los módulos dentro del entorno. Cada una de estas clases gestiona funciones específicas para la operación y análisis de redes de distribución. En la figura 2 se presenta una visualización de la organización de estas clases.

Abrir

Se desarrolló esta clase para gestionar la carga de modelos de redes hidráulicas a partir de archivos en formato .inp (EPANET) o .xlsx (Excel). Permite convertir estos archivos en modelos utilizables dentro del sistema, asegurando compatibilidad con las herramientas de simulación.

Exportar

Se implementó la clase Exportar para gestionar la exportación de modelos de red creados o modificados dentro del entorno de trabajo. Los archivos se guardan en formato .inp, garantizando su compatibilidad con EPANET y facilitando su reutilización en otras plataformas.

Opciones

Se diseñó la clase Opciones para configurar los parámetros hidráulicos y temporales de la simulación, incluyendo unidades, fórmula de pérdida de carga, duración e intervalos de cálculo. Se establecieron los algoritmos para aplicar correctamente estos ajustes al modelo, optimizando su precisión y funcionalidad.

Diseñar

Se elaboró la clase Diseñar para realizar el diseño y análisis de redes de distribución de agua potable conforme a las Resoluciones 0330 de 2017 y 799 de 2021. Se incorporaron algoritmos para verificar presiones, velocidades y áreas de aporte, además de permitir ajustes iterativos en los diámetros de tuberías, asegurando el cumplimiento normativo y la eficiencia del sistema.

Modelar

Se creó la clase Modelar para gestionar la edición de elementos de la red hidráulica, como nodos y tuberías. Se habilitó la modificación de demandas, rugosidades y patrones de consumo, garantizando flexibilidad y precisión en la configuración del modelo.

SimulacionEpanet

Se desarrolló la clase SimulacionEpanet para ejecutar simulaciones hidráulicas utilizando el motor de cálculo de EPANET. Se implementaron algoritmos para calcular presiones, demandas, velocidades y caudales, proporcionando resultados detallados sobre el comportamiento de la red.

DisrupcionFugas

Se implementó la clase DisrupcionFugas para modelar la ocurrencia de fugas en la red y evaluar su impacto en la distribución del agua y en la resiliencia del sistema. Se incorporaron algoritmos para seleccionar tuberías afectadas, definir fugas y establecer tiempos de simulación, modificando dinámicamente el modelo para analizar su efecto en la operación hidráulica.

DisrupcionTerremotos

Se desarrolló la clase DisrupcionTerremotos para modelar el impacto de terremotos en la red de distribución de agua. Se integraron algoritmos para simular daños en tuberías y evaluar su efecto en el suministro, permitiendo definir parámetros sísmicos, generar fugas con base en curvas de fragilidad y analizar la recuperación del sistema tras el evento.

PestanaRed

Se creó la clase PestanaRed para gestionar la visualización de la red dentro de la interfaz gráfica. Se implementaron herramientas para explorar la estructura y los componentes del sistema, facilitando el análisis de resultados mediante la representación de presiones, demandas, velocidades y caudales. Se añadieron algoritmos para la personalización y actualización dinámica para mejorar la interpretación de datos.

PestanaResultados

Se desarrolló la clase PestanaResultados para gestionar la visualización y análisis de los resultados de las simulaciones hidráulicas. Se incorporaron algoritmos para generar gráficos

de series de tiempo, barras y boxplot, además de tablas estructuradas, permitiendo interpretar los datos y comparar escenarios para evaluar el comportamiento de la red al explorar métricas clave como presión, demanda, velocidad y caudal en nodos y tuberías.

Resiliencia

Se implementó la clase Resiliencia para calcular métricas que evalúan la capacidad de la red para mantener el servicio ante eventos disruptivos. Se incorporaron indicadores como el índice de Todini (Ir) y el índice de resiliencia modificado (M_{Ir}), junto con su interpretación a través de los valores medio, máximo, mínimo y en hora pico. Esto proporciona un análisis detallado de la eficiencia hidráulica y la capacidad de recuperación del sistema.

Figura 2.

Clases Principales desarrolladas

```
#----- CLASES PRINCIPALES

# Clase Abrir: Permite cargar archivos con extensión .inp y .xlsx para modelar redes hidráulicas utilizando WNTR
class Abrir(QAction):

# Clase Exportar: Proporciona funcionalidad para exportar el modelo de red cargado como un archivo .inp
class Exportar(QAction):

# Clase Opciones: Permite configurar las opciones hidráulicas del modelo y los tiempos de las simulaciones
class Opciones(QAction):

# Clase Diseñar: Permite diseñar y ajustar redes hidráulicas basándose en la Resolución 0330 del 2017
class Diseñar(QDialog):

# Clase Modelar: Permite modelar la red con base en el ajuste de parámetros de conexiones y tuberías de la red
class Modelar(QAction):

# Clase SimulacionEpanet: Permite ejecutar simulaciones hidráulicas utilizando el simulador de EPANET
class SimulacionEpanet(QAction):

# Clase DisrupcionFugas: Permite simular fugas en la red utilizando WNTR
class DisrupcionFugas(QAction):

# Clase DisrupcionTerremotos: Permite simular terremotos en la red utilizando WNTR
class DisrupcionTerremotos(QAction):

# Clase PestanaRed: Permite visualizar la red utilizando las herramientas de graficado de WNTR y Matplotlib
class PestanaRed(QWidget):

# Clase PestanaResultados: Permite visualizar y graficar los resultados obtenidos de la simulación utilizando Matplotlib
class PestanaResultados(QWidget):

# Clase Resiliencia: Permite calcular índices de resiliencia para determinar la resiliencia de la red
class Resiliencia(QAction):
```

Nota: Organización de las distintas clases que representan los módulos desarrollados para el proyecto.

3.3.2. Clases Auxiliares

Las clases auxiliares son aquellas que complementan el funcionamiento del entorno brindando soporte a los módulos principales. En la Figura 3 se presenta una visualización de la organización de estas clases. A continuación, se describen cada una de ellas.

Mensajes

Se implementó la clase Mensajes para gestionar la interacción con el usuario mediante cuadros de diálogo emergentes. Se incorporaron notificaciones de errores, advertencias y confirmaciones, asegurando una comunicación efectiva durante la ejecución del software.

CargarDatos

Se desarrolló la clase CargarDatos para procesar y visualizar los datos generados en las simulaciones hidráulicas. Se implementó la organización de la información en tablas interactivas dentro de la interfaz gráfica, permitiendo explorar y analizar los resultados de manera estructurada y dinámica.

Figura 3.

Clases Auxiliares desarrolladas

```
#----- CLASES AUXILIARES

# Clase Mensajes: Proporciona métodos estáticos para mostrar mensajes de error, advertencia, información y preguntas al usuario
class Mensajes:

# Clase CargarDatos: Precarga los datos de presiones, demandas y velocidades para generar tablas de datos más eficientes
class CargarDatos(QAbstractTableModel):
```

Nota: Visualización de las clases desarrolladas para complementar y hacer más eficiente el entorno y su interacción.

Por último, se diseñó un archivo Excel estructurado en hojas organizadas con la información esencial para la creación y representación de una red de distribución de agua potable. Este formato facilita la carga de datos en el entorno de modelación y en el módulo Diseñar, permitiendo un ingreso ordenado y estandarizado de los parámetros de la red. La figura 4 ilustra el formato del archivo en detalle.

A continuación, se describe la estructura del archivo y el propósito de cada hoja:

1. Conexiones

Esta hoja contiene información sobre los nodos de conexión o "junctions" de la red. Los datos principales incluyen:

- **ID:** Identificador único del nodo.
- **Demanda:** Caudal esperado en el nodo (en m³/s).
- **Patrón de demanda:** Patrón de variación de demanda asociado al nodo (opcional).
- **Elevación:** Altitud del nodo (en metros).
- **Coord X, Coord Y:** Coordenadas espaciales del nodo para la representación gráfica.

2. Embalses

Esta hoja detalla los embalses o "reservoirs" de la red. Los datos principales incluyen:

- **ID:** Identificador único del embalse.
- **Altura:** Elevación o nivel constante del embalse (en metros).
- **Coord X, Coord Y:** Coordenadas espaciales para su ubicación.

3. Tanques

Esta hoja incluye información sobre los tanques de almacenamiento en la red. Los datos principales son:

- **ID:** Identificador único del tanque.
- **Elevación:** Altura del suelo donde está el tanque (en metros).
- **Nivel Inicial, Nivel Mínimo, Nivel Máximo:** Niveles de agua inicial, mínimo y máximo en el tanque (en metros).
- **Diámetro:** Diámetro del tanque (en metros).
- **Coord X, Coord Y:** Coordenadas espaciales del tanque.

4. Tuberías

Esta hoja describe las tuberías o "pipes" de la red. Los datos incluyen:

- **ID:** Identificador único de la tubería.
- **Nodo inicio, Nodo fin:** Nodos conectados por la tubería.
- **Longitud:** Longitud de la tubería (en metros).
- **Diámetro:** Diámetro de la tubería (en metros).
- **Rugosidad:** Coeficiente de rugosidad para las pérdidas hidráulicas.
- **Coeficiente de pérdidas:** Factor que incluye pérdidas menores.

5. Bombas

Esta hoja contiene información sobre las bombas en la red. Los datos principales son:

- **ID:** Identificador único de la bomba.
- **Nodo inicio, Nodo fin:** Nodos conectados por la bomba.
- **Tipo de bomba:** Tipo de bomba utilizada (e.g., potencia o curva de eficiencia).
- **Parámetro:** Valor asociado al tipo de bomba seleccionado.
- **Estado inicial:** Estado operativo inicial (encendido o apagado).

6. Válvulas

Esta hoja detalla las válvulas en la red. Los datos incluyen:

- **ID:** Identificador único de la válvula.
- **Nodo inicio, Nodo fin:** Nodos conectados por la válvula.
- **Diámetro:** Diámetro de la válvula (en metros).
- **Tipo de válvula:** Tipo de control (e.g., PRV, PSV, FCV).
- **Coeficiente de pérdidas:** Factor para pérdidas hidráulicas.
- **Consigna:** Valor de consigna para el control (opcional).
- **Estado inicial:** Estado operativo inicial (encendido o apagado).

7. Patrones

Esta hoja contiene patrones de demanda aplicables a nodos. Los datos principales son:

- **ID:** Identificador del patrón.

- **Patrón:** Serie de valores que representan la variación horaria de la demanda.

8. Curvas

Incluye información sobre curvas hidráulicas asociadas a bombas o válvulas. Los datos incluyen:

- **ID:** Identificador único de la curva.
- **Tipo de curva:** Definición (e.g., curva de potencia, eficiencia).
- **Puntos:** Lista de pares ordenados (x, y) que definen la curva.

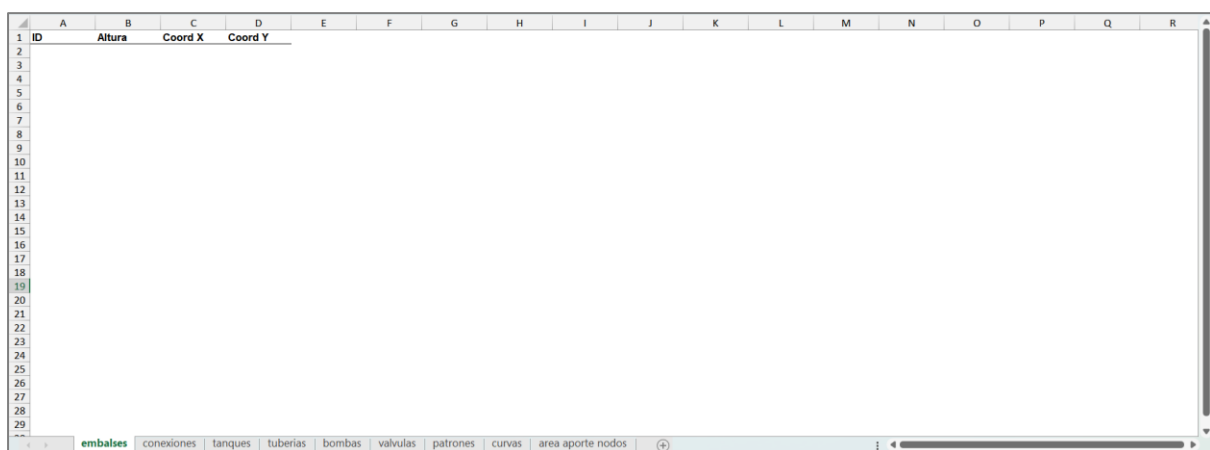
9. Área aporte nodos

Esta hoja contiene información sobre el área de contribución de cada nodo en la red de distribución. Los datos principales incluyen:

- **ID:** Identificador único del nodo.
- **Área aporte (m2):** Superficie específica que aporta demanda al nodo.
- **Área total (m2):** Superficie total de la zona que influye en la red.
- **Población:** Número estimado de habitantes de la zona.

Figura 4.

Archivo Excel para creación de redes de distribución



Nota: Archivo en formato Excel utilizado para la creación de redes de distribución de agua potable, facilitando la organización y análisis de los datos pertinentes.

3.4.Codificación del entorno de trabajo e interfaz

Se desarrolló la clase *VentanaPrincipal*, núcleo de la interfaz gráfica del entorno, centralizando los módulos y facilitando la ejecución de todas las actividades desde un mismo espacio. Su propósito es integrar las herramientas en una estructura organizada y accesible. En la figura 5 se puede observar esta clase.

Para su estructuración, se implementó una barra de herramientas con accesos directos a los módulos principales, una barra de estado para visualizar información en tiempo real y un sistema de pestañas para organizar la presentación de resultados.

Posteriormente, se integraron los módulos desarrollados en la interfaz, permitiendo ejecutar todas las funciones de manera unificada sin depender de herramientas externas y asegurando una transición fluida entre los datos de entrada y los resultados obtenidos.

Finalmente, se implementó un sistema de gestión de datos que mantiene actualizado el modelo de red y almacena los resultados de cada simulación. Además, se añadió una función para limpiar la información de la sesión actual, facilitando la ejecución de nuevos procesos sin interferencias.

Figura 5.

Clase VentanaPrincipal

```
#----- CLASE INTERFAZ

# Clase VentanaPrincipal: Implementa la ventana principal del entorno utilizando PyQt5
class VentanaPrincipal(QMainWindow):
```

Nota: Clase que representa la interfaz gráfica de usuario principal, permitiendo la interacción con las funcionalidades del sistema.

3.5.Optimización y depuración del código

En esta etapa se mejoró el código mediante un proceso iterativo de revisión, análisis y corrección del código, con el objetivo de garantizar un rendimiento eficiente y una interacción estable entre la interfaz gráfica y la lógica interna del entorno.

Inicialmente, se identificaron inconsistencias en la integración de los módulos, como errores en la lectura de archivos y en la sincronización de datos entre el modelo hidráulico y los resultados de simulación. Para corregir esto, se estableció un mecanismo de validación y actualización estructurada de datos, evitando desajustes durante la ejecución.

A continuación, se optimizó el rendimiento eliminando procesos innecesarios y reorganizando estructuras de código para agilizar la ejecución de cálculos y la generación de visualizaciones. Se mejoró también la actualización de gráficos, evitando acumulaciones de datos que ralentizaran la interfaz.

La depuración se centró en mejorar la gestión de eventos y validaciones dentro de la interfaz, implementando controles que previnieran entradas incorrectas y aseguraran una respuesta coherente del sistema ante diferentes escenarios de uso.

Finalmente, se realizó una refactorización del código para mejorar su claridad y mantenimiento, estandarizando nomenclaturas y modularizando funciones clave. Se llevaron a cabo pruebas preliminares con distintos escenarios para verificar la estabilidad del sistema y su correcta respuesta bajo diferentes condiciones de simulación.

3.6. Validación de la metodología

Una vez finalizada la depuración del código y verificada la operatividad del entorno, se obtuvo la versión definitiva del programa. Para validar su fiabilidad y precisión, se seleccionaron tres casos de estudio teóricos: un prototipo de red extraída de la documentación oficial de WNTR (Net1.inp), junto con dos redes adicionales proporcionadas por el Ingeniero Diego Sánchez (Red_Caso1.inp y red.Qmd.inp).

Cada una de estas redes fue evaluada utilizando el programa desarrollado para obtener resultados clave como presiones, velocidades, demandas y caudales. Posteriormente, se replicaron las mismas simulaciones en EPANET bajo condiciones operativas normales

garantizando condiciones equivalentes en los modelos hidráulicos., ya que EPANET no cuenta con módulos para la simulación de fugas, terremotos o análisis de resiliencia.

A partir de los resultados obtenidos, se llevó a cabo un análisis comparativo con el objetivo de verificar la precisión del modelo y validar la metodología propuesta.

3.6.1. Casos de estudio

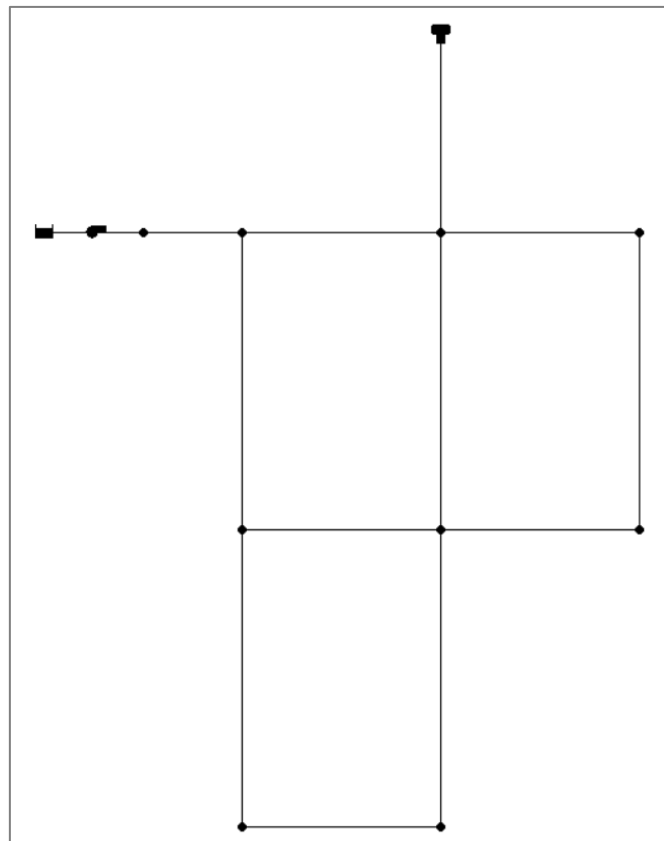
A continuación, se presentan, a manera de resumen, los tres casos de estudio utilizados para la validación de la metodología:

Caso Net1

La red “Net1” (figura 6), es una red sencilla que se compone por 1 embalse de cabecera, 1 depósito elevado, 1 bomba, 9 nodos de consumo y 12 tuberías. Todas las tuberías están hechas en PVC, con un coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams de 100.

Figura 6.

Red “Net1”



Nota: Representación de la red “Net1” en el entorno de modelación hidráulica

La bomba opera con una curva de un solo punto, proporcionando un caudal de 94.64 LPS y una altura de 76.2 msnm.

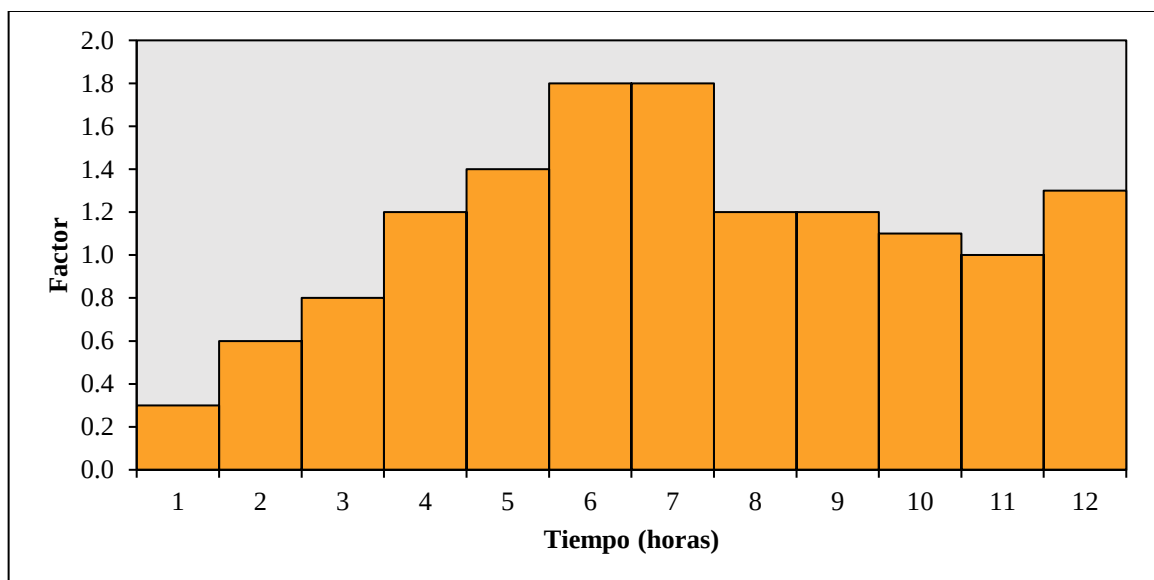
La instrucción de los controles es la siguiente:

- LINK 9 OPEN IF NODE 2 BELOW 33.528
- LINK 9 CLOSED IF NODE 2 ABOVE 42.672

En la Figura 7 se presenta una de las propiedades de los elementos que componen el sistema como lo es el patrón de demanda de los nodos de consumo.

Figura 7.

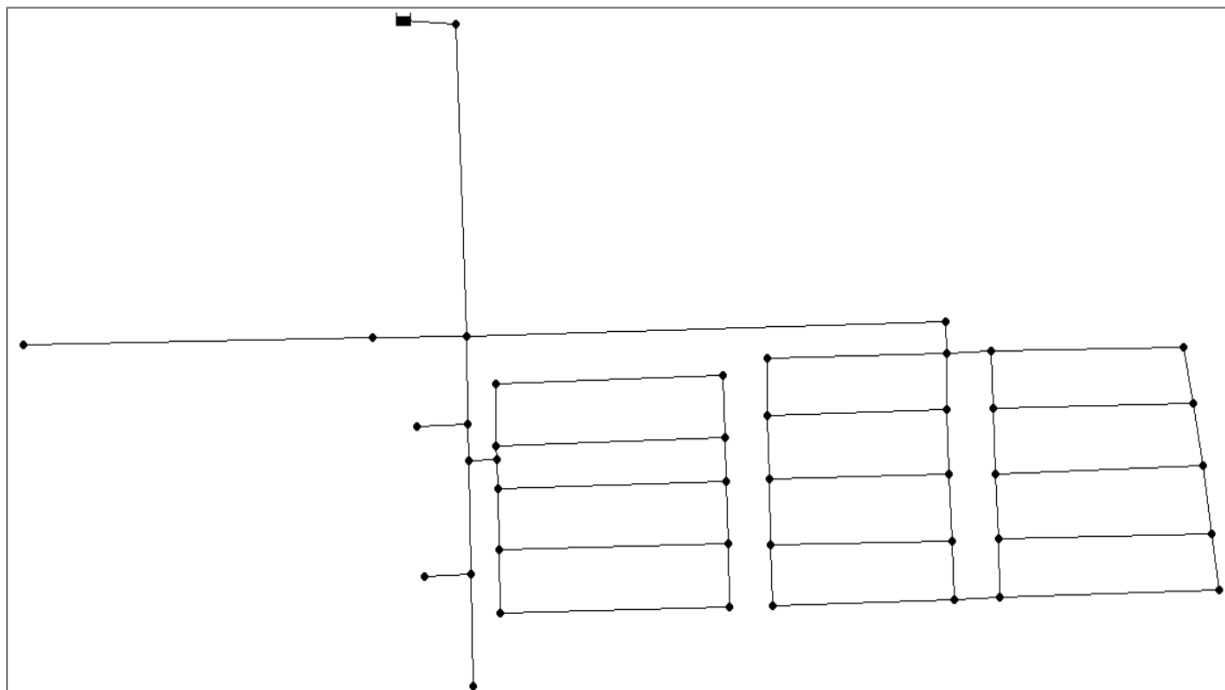
Patrón de demanda de los nodos de consumo de la red “Net1”



Nota: Gráfico de barras que muestra el patrón de demanda de los nodos de consumo de la red

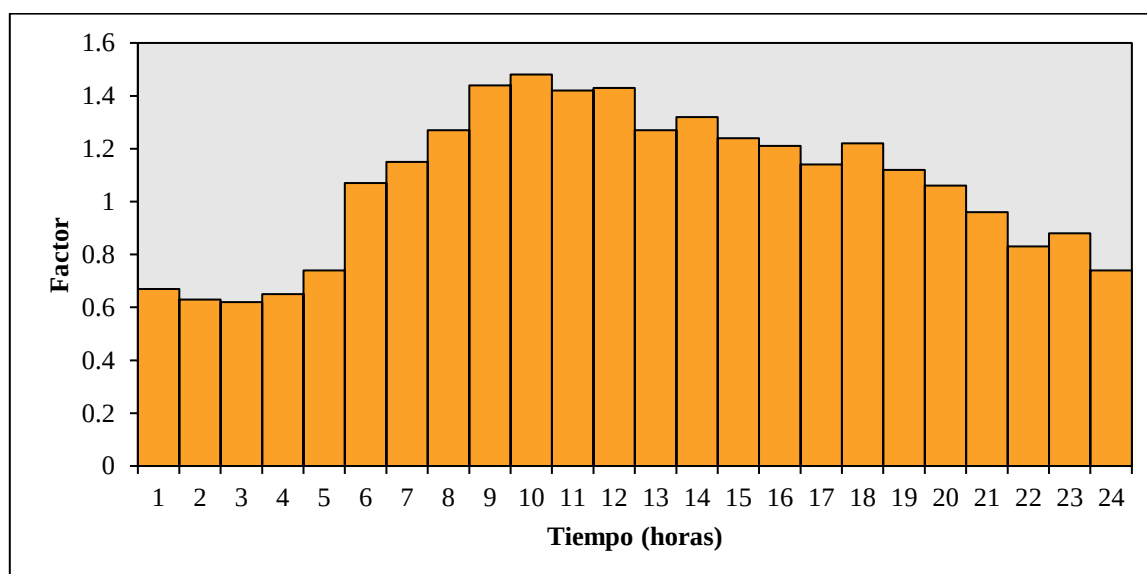
Caso Red_Caso1

La red “Red_Caso1” (figura 8), es una red que podría considerarse pequeña a mediana, esta se compone por 1 embalse de cabecera, 42 nodos de consumo y 55 tuberías. Todas las tuberías están hechas en PVC, con un coeficiente de rugosidad de Darcy-Weisbach de 0.0015 y pérdidas menores de 1.3 mca.

Figura 8.*Red “Red_Caso1”*

Nota: Representación de la red “Red_Caso1” en el entorno de modelación hidráulica

En la Figura 9 se presenta una de las propiedades de la red como es el patrón de demanda de los nodos de consumo.

Figura 9.*Patrón de demanda de los nodos de consumo de la red “Red_Caso1”*

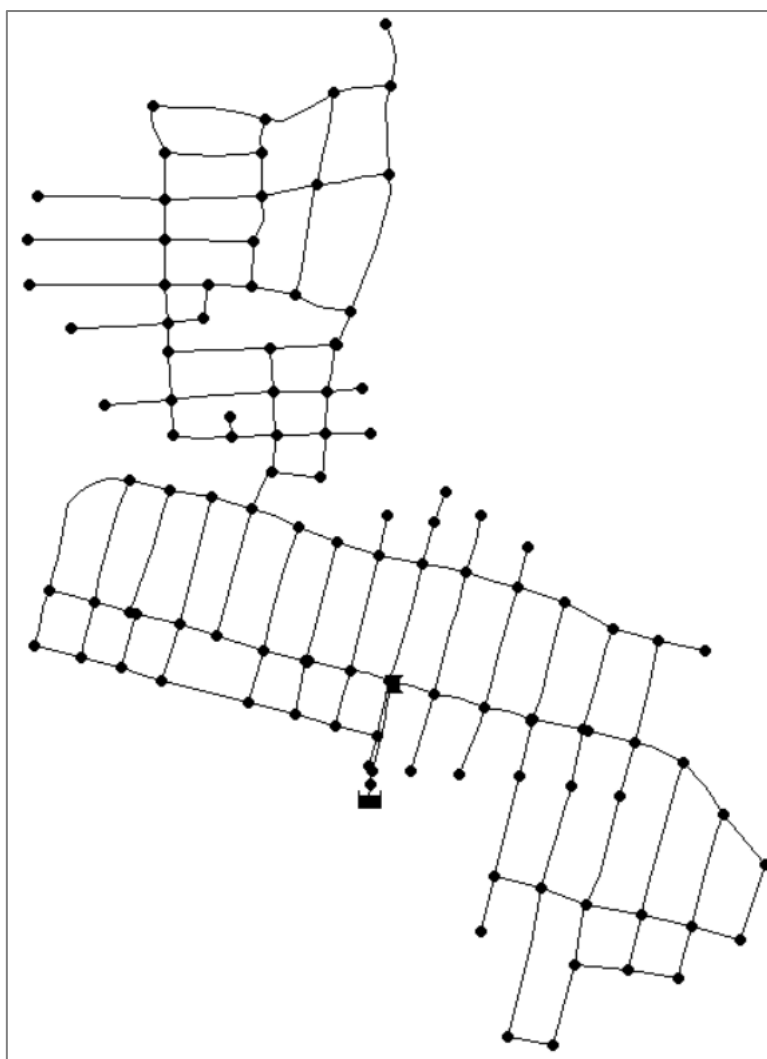
Nota: Gráfico de barras que muestra el patrón de demanda de los nodos de consumo de la red.

Caso red.Qmd

La red “red.Qmd” (Figura 10), es una red de tamaño mediana que se compone por 1 embalse de cabecera, 115 nodos de consumo, 157 tuberías y 1 válvula reguladora de presión, esta última cuenta con un diámetro de 103.42 mm, una consigna de 33.8 mca y unas pérdidas menores de 5 mca. Todas las tuberías están hechas en PVC, con un coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams de 140 y pérdidas menores de 5 mca.

Figura 10.

Red “red.Qmd”

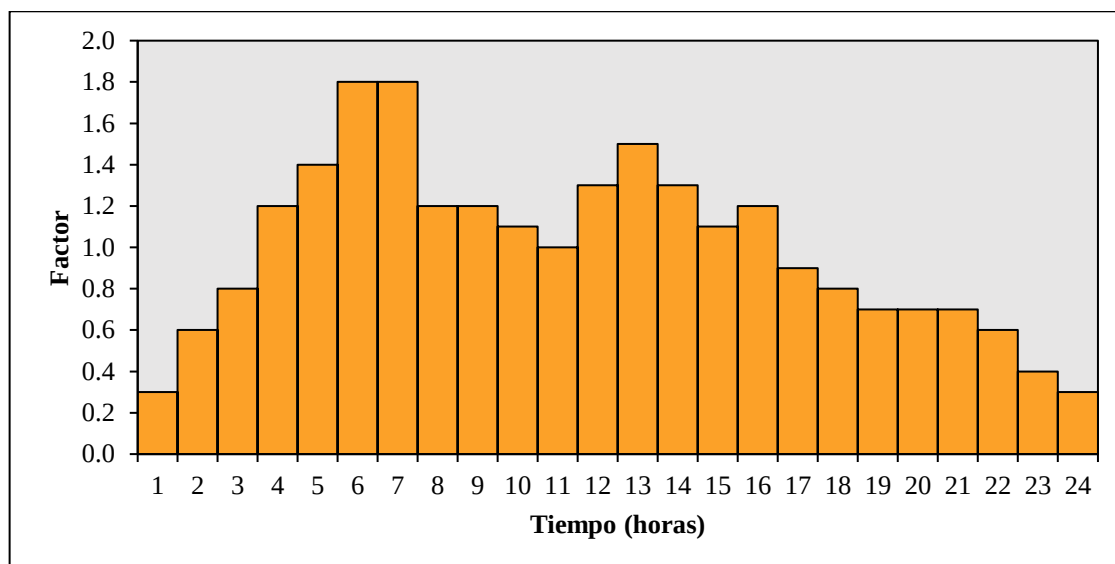


Nota: Representación de la red “red.Qmd”

En la Figura 11 se presenta una de las propiedades de la red como es el patrón de demanda de los nodos de consumo.

Figura 11.

Patrón de demanda de los nodos de consumo de la red “red.Qmd”



Nota: Gráfico de barras que muestra el patrón de demanda de los nodos de consumo de la red.

3.6.2. Evaluación de casos en el entorno de modelación hidráulica

Como punto de partida para la evaluación de los casos en el entorno, se siguió lo estipulado en el Artículo 63 de la Resolución 0330 de 2017, el cual establece que el diámetro mínimo de las tuberías en redes de distribución no deberá ser inferior a 3". Este lineamiento se aplicó a todas las tuberías de los tres casos.

Los diseños de las redes se realizaron de acuerdo con la Resolución 0330 de 2017 en sus artículos 61 y 62. El primero establece que “La presión dinámica mínima en la red de distribución debe ser de 10 mca en sistemas con poblaciones de diseño de hasta 12500 habitantes.”, y en su párrafo 1, establece que “El área a abastecer con una presión dinámica inferior puede corresponder hasta el 10% del área total, siempre que la presión mínima sea superior o igual a 8 mca para poblaciones de diseño de menos de 12500 habitantes.

Se puede abastecer con una presión dinámica hasta el 5% del área total, siempre que la presión mínima sea superior o igual a 5 m c a para poblaciones de diseño de menos de 12500 habitantes.”

El segundo establece que para todas las poblaciones “A partir de la expedición de la presente resolución, para sistemas nuevos u optimizaciones, la presión estática máxima debe ser de 50 m c a”, y en su parágrafo 1, establece que “el área a abastecer con una presión estática superior puede corresponder al 10% del área de la zona de presión, desde que no se sobrepase una presión de 55 mca y hasta el 5% del área de la zona de presión, desde que no sobrepase una presión de 60 mca”

La población en todas las redes es menor a 12500 habitantes, por lo tanto, se acogió a este artículo. La norma también establece que las tuberías no deben sobrepasar una velocidad máxima de 5 m/s.

Al simular una fuga en las redes, se seleccionaron diámetros de fuga considerablemente grandes, ubicándolas siempre en tuberías cercanas al embalse. Buscando evaluar el comportamiento de la red ante una reducción del flujo en la red principal de transporte de caudal.

Para modelar el impacto de un sismo, se utilizó el módulo Simular Terremoto. Se aplicó un mismo evento sísmico a todas las redes con el objetivo de evaluar y comparar cómo afectaría de manera diferenciada a cada una de ellas. Para caracterizar el sismo, se utilizaron los parámetros expuestos en la documentación de WNTR: una magnitud de 6.5 en la escala de Richter, una profundidad de origen de 10000 m y una duración de 24 horas. En cuanto a la curva de fragilidad, se utilizó la disponible en la documentación de WNTR, definida mediante una función probabilística exponencial con un factor de escala de 0.2 para el estado de daño menor y de 1 para el estado de daño mayor, mientras que el factor forma se fijó en 0 para ambos estados de daño.

En última instancia, las redes modificadas se exportaron para tener el archivo .inp con las configuraciones realizadas.

Evaluación caso Net1

En primera instancia, este caso de red trabajaba en unidades del Sistema Inglés, para garantizar una comparación precisa de los resultados, era necesario que la red estuviera completamente en el mismo sistema de unidades, permitiendo así su análisis tanto en el entorno desarrollado como en EPANET de manera homogénea.

Para lograrlo, se utilizó el Excel de diseño para reconstruir la red con sus datos en el Sistema Internacional. Se realizaron las conversiones necesarias y se generó la red en el entorno, exportándola posteriormente como un archivo INP.

Operación normal de la red

Se cargó la red en el entorno y se realizó una simulación para comprobar los datos de presiones, estos eran bastante elevados al utilizar un diámetro de tubería de 3" y por ello se hizo un diseño preliminar empleando el módulo Diseñar iterando en los diámetros de tubería, pero las sobrepresiones no disminuían a valores aceptables debido a la presencia del sistema de bombeo. Para mitigar este comportamiento, se planteó un rediseño de la red eliminando el sistema de bombeo y el tanque de almacenamiento, transformando el sistema en uno operado exclusivamente por gravedad. La bomba fue reemplazada por una tubería, mientras que el tanque fue sustituido por un nodo de consumo.

Tras modificar la red, se llevó a cabo el diseño utilizando el módulo Diseñar. Para ello, se consideró una población de 500 habitantes, un área total de la red de 2400 m² y las áreas de aporte correspondientes a cada nodo.

La ecuación empleada para el cálculo de pérdidas de carga fue la de Hazen-Williams, con un coeficiente de rugosidad inicial de 100 para la modelación.

A partir de estos criterios, se realizó el proceso iterativo de ajuste de diámetros hasta lograr valores de presión y velocidad dentro de los límites establecidos. Finalmente, se ejecutó un último diseño modificando el coeficiente de rugosidad a 140, lo que redujo significativamente los diámetros en todas las tuberías. Con este último ajuste se consolidó el diseño final de la red.

Ya teniendo el diseño de la red, se realizaron simulaciones mediante el módulo Simulación Epanet para obtener los resultados que luego se representaron, y, con los que se calcularon tanto el Índice de Todini como el Índice de Resiliencia Modificado para medir la resiliencia de la red.

Simulación de fuga

Se ejecutó el módulo Simular Fugas configurando una fuga en la tubería “10”, se estableció un diámetro de fuga de 200 mm, se ingresó una presión requerida y presión mínima de 10 y 0 mca, respectivamente; para la duración del evento, la hora de inicio fue en la hora 2 y la hora de finalización o reparación fue en la hora 8.

Simulación de terremoto

En primer lugar, se definió la ubicación del epicentro en las coordenadas $X = 35$, $Y = 75$. Posteriormente, se establecieron los criterios mínimos de operación con base en la presión mínima admisible en la red, fijando una presión requerida de 10 mca y una presión mínima de 0 mca. Además, se estableció un tiempo de aparición de fugas a la hora 5 y reparación de fugas a la hora 15 y un total de 5 fugas a reparar. Finalmente, la asignación de daños en la red se realizó mediante el método de probabilidad basado en la relación $RR \times L$.

Después de ingresar los parámetros requeridos, se ejecutó la simulación y se identificaron las fugas generadas en la red. La configuración inicial fue suficiente para obtener resultados relevantes, ya que al reparar las cinco fugas más severas se restableció la red a un estado óptimo.

Evaluación caso Red_Caso1

Antes de utilizar cualquier módulo, la red operaba con la ecuación de Darcy-Weisbach para el cálculo de pérdidas por carga. Sin embargo, fue necesario modificarla y emplear la ecuación de Hazen-Williams, ya que los módulos de disrupción utilizan el motor de simulación de WNTR, el cual no es compatible con la ecuación de Darcy-Weisbach. Debido a este cambio, también se ajustó el coeficiente de rugosidad de las tuberías, estableciéndose en un valor de 150, que al modelar la red arroja resultados muy similares a los obtenidos con los anteriores datos para modelar.

Para evaluar esta red, se realizó una verificación del diseño existente con el propósito de determinar si los diámetros seleccionados eran los más adecuados o si era posible realizar ajustes que optimizaran tanto la selección de diámetros como los resultados de la modelación hidráulica.

Operación normal de la red

Se cargó la red en el entorno y se realizó una simulación para evaluar los datos de presión, observándose variaciones entre valores negativos y positivos en diferentes horas. No obstante, se identificó que las presiones en el nodo "D-4" cumplían con la normativa al encontrarse dentro de los rangos permitidos. Debido a esto, se determinó que la tubería de salida del embalse, "T-1", la cual conecta con el nodo "D-4", requería un aumento en su diámetro para permitir una mayor distribución de caudal hacia las demás tuberías de la red.

Para este caso, se consideró una población de 3500 habitantes, un área total de la red de 160 000 m² y las áreas de aporte correspondientes a cada nodo. A partir de estos criterios, se llevó a cabo el proceso iterativo de ajuste de diámetros, priorizando el incremento en las tuberías principales que transportaban los mayores volúmenes de caudal. Como resultado, muchas tuberías no requirieron modificaciones en sus diámetros, ya que la presión en los nodos cumplía con los valores normativos establecidos.

Al igual que en el caso anterior, ya teniendo el diseño de la red, se realizaron simulaciones mediante el módulo Simulación Epanet para obtener los resultados que luego se representaron, y, con los que se calcularon tanto el Índice de Todini como el Índice de Resiliencia Modificado para medir la resiliencia de la red.

Simulación de fuga

Se ejecutó el módulo Simular Fugas configurando una fuga en la tubería "T-4", se estableció un diámetro de fuga de 100 mm, se ingresó una presión requerida y presión mínima de 10 y 0 mca, respectivamente; para la duración del evento, la hora de inicio fue en la hora 7 y la hora de finalización o reparación fue en la hora 13.

Simulación de terremoto

En primer lugar, se definió la ubicación del epicentro en las coordenadas $X = 6300$, $Y = 8350$. Posteriormente, se establecieron los criterios mínimos de operación con base en la presión mínima admisible en la red, fijando una presión requerida de 10 mca y una presión mínima de 0 mca. Además, se estableció un tiempo de aparición de fugas a la hora 5 y reparación de fugas a la hora 15 y un total de 6 fugas a reparar. Finalmente, la asignación de daños en la red se realizó mediante el método de probabilidad basado en el pga.

Después de ingresar los parámetros requeridos, se ejecutó la simulación y se identificaron las fugas generadas en la red. La configuración inicial de reparación de fugas resultó insuficiente, ya que, incluso seleccionando las 6 fugas más severas, la red no logró recuperar un estado funcional adecuado, dado que las presiones caían por debajo del límite admisible de 10 mca. Se ejecutó una segunda simulación ampliando la reparación a las 10 fugas más severas; sin embargo, la red aún no alcanzó un estado óptimo, ya que las presiones continuaban por debajo de 10 mca. En un tercer y último intento, se repararon 19 fugas, esta vez seleccionadas bajo el criterio de que su demanda fuera igual o superior a 0.01 LPS. Con este ajuste, la red logró una recuperación más efectiva tras el sismo.

Evaluación caso red.Qmd

Similar al caso Red_Caso1, para evaluar esta red, se realizó una verificación del diseño existente con el propósito de determinar si los diámetros seleccionados eran los más adecuados o si era posible realizar ajustes que optimizaran tanto la selección de diámetros como los resultados de la modelación hidráulica.

Operación normal de la red

Se cargó la red en el entorno y se realizó una simulación para evaluar los datos de presión, observándose un comportamiento similar al del caso anterior. En este caso, el nodo "nc1" presentó una presión considerablemente alta, lo que indicaba la necesidad de aumentar el diámetro de la tubería "P150" para mejorar la distribución de caudal hacia las demás tuberías de la red.

Para este caso, se consideró una población de 7245 habitantes, un área total de la red de 230000 m² y las áreas de aporte correspondientes a cada nodo. A partir de estos criterios, se llevó a cabo el proceso iterativo de ajuste de diámetros, priorizando el incremento en las tuberías principales que transportaban los mayores volúmenes de caudal. Similar al caso anterior, como resultado, muchas tuberías no requirieron modificaciones en sus diámetros, ya que la presión en los nodos cumplía con los valores normativos establecidos.

Similar a los casos anteriores, ya teniendo el diseño de la red, se realizaron simulaciones mediante el módulo Simulación Epanet para obtener los resultados que luego se representaron, y, con los que se calcularon tanto el Índice de Todini como el Índice de Resiliencia Modificado para medir la resiliencia de la red.

Simulación de fuga

Se ejecutó el módulo Simular Fugas configurando una fuga en la tubería "p151", se estableció un diámetro de fuga de 150 mm, se ingresó una presión requerida y presión mínima

de 10 y 0 mca, respectivamente; para la duración del evento, la hora de inicio fue en la hora 4 y la hora de finalización o reparación fue en la hora 10.

Simulación de terremoto

En primer lugar, se definió la ubicación del epicentro en las coordenadas $X = 10$, $Y = 50$. Posteriormente, se establecieron los criterios mínimos de operación con base en la presión mínima admisible en la red, fijando una presión requerida de 10 mca y una presión mínima de 0 mca. Además, se estableció un tiempo de aparición de fugas a la hora 5 y reparación de fugas a la hora 15 y un total de 10 fugas a reparar. Finalmente, la asignación de daños en la red se realizó mediante el método de probabilidad basado en el $RR \times L$.

Después de ingresar los parámetros requeridos, se ejecutó la simulación y se identificaron las fugas generadas en la red. Sin embargo, estas no comprometieron significativamente el funcionamiento del sistema, lo que permitió que la red continuara operando a pesar del sismo.

3.6.3. Evaluación de casos en EPANET

Para evaluar la precisión del entorno desarrollado, se llevaron a cabo simulaciones en EPANET, utilizando las redes modificadas en el programa. Este proceso consistió en importar los archivos generados en el entorno y procesarlos dentro de EPANET, para así realizar las simulaciones hidráulicas bajo condiciones operativas normales.

4. RESULTADOS

A continuación, se presentan el entorno de modelación hidráulica desarrollado y los resultados obtenidos para validar su funcionamiento.

4.1. Ventana principal

En la Figura 12 se muestra la ventana principal del entorno de modelación hidráulica, que constituye el punto central de interacción del usuario con las diferentes herramientas del programa. Desde esta interfaz, es posible acceder a las distintas secciones disponibles para el análisis y la gestión de redes de distribución de agua.

La interfaz está organizada en varias secciones que optimizan el flujo de trabajo. Entre ellas se encuentra la barra de herramientas, donde se agrupan los módulos principales. Ubicada en la parte superior de la ventana, esta barra contiene los botones que activan las funcionalidades de cada módulo para la tarea específica que se vaya a realizar.

Justo debajo, se encuentra el sistema de pestañas, que permite gestionar la información de la red y sus resultados. La pestaña 'Graficar Red' está destinada a la representación visual de la red y sus componentes. En esta sección, es posible visualizar distintas magnitudes para nodos o tuberías en un instante específico de la simulación, siempre que esta se haya ejecutado previamente. Además, se puede personalizar la gráfica adaptando convenientemente su estilo.

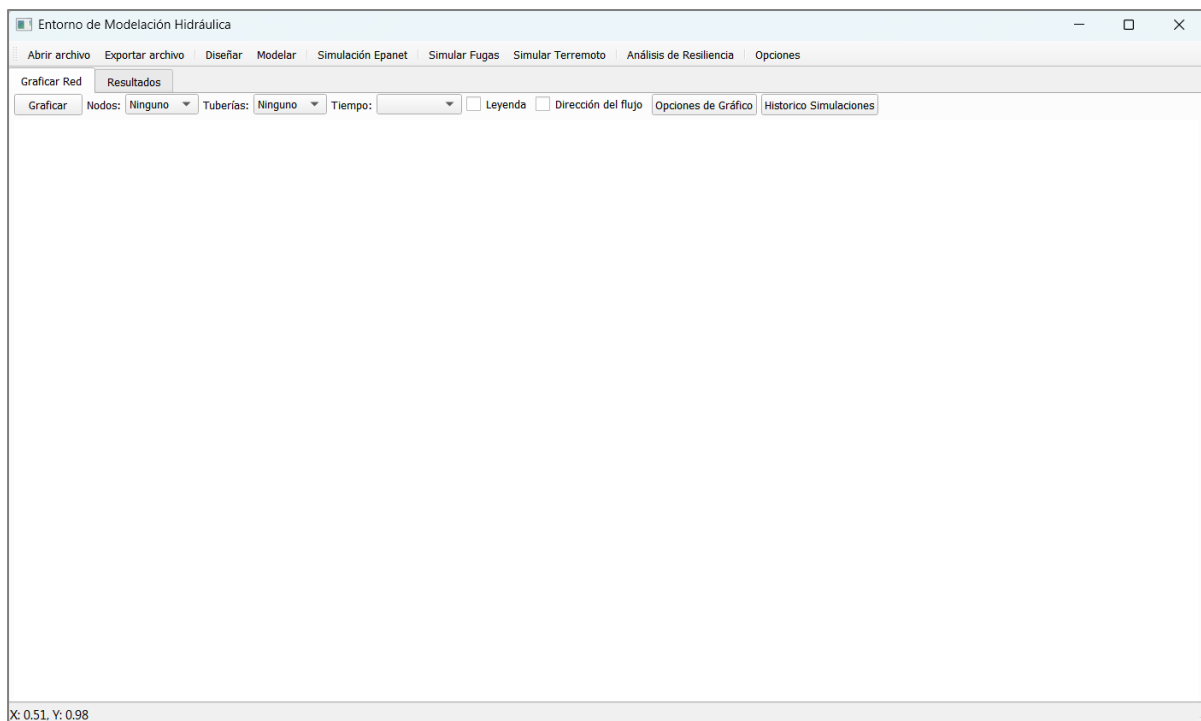
La pestaña 'Resultados' ofrece herramientas para el análisis de los datos obtenidos en la simulación, ya sea mediante gráficos o la evaluación de valores numéricos que describen el comportamiento hidráulico de la red. En esta pestaña, se pueden generar series de tiempo, gráficos de barras y boxplot, permitiendo al usuario seleccionar la magnitud a representar y los elementos a analizar. Adicionalmente, se dispone de una vista tabular que muestra los datos de forma numérica en distintos instantes de tiempo de las simulaciones realizadas.

Tanto en la pestaña 'Graficar Red' como en 'Resultados', el usuario puede acceder a las simulaciones anteriores, facilitando la comparación y el análisis de múltiples escenarios modelados en el entorno.

Por último, en la parte inferior de la ventana se encuentra la barra de estado, diseñada para mostrar información en tiempo real sobre la red, como las coordenadas del cursor en el lienzo, facilitando la navegación dentro del modelo.

Figura 12.

Ventana principal



Nota: Visualización del entorno desarrollado para la modelación hidráulica.

4.2.Módulos

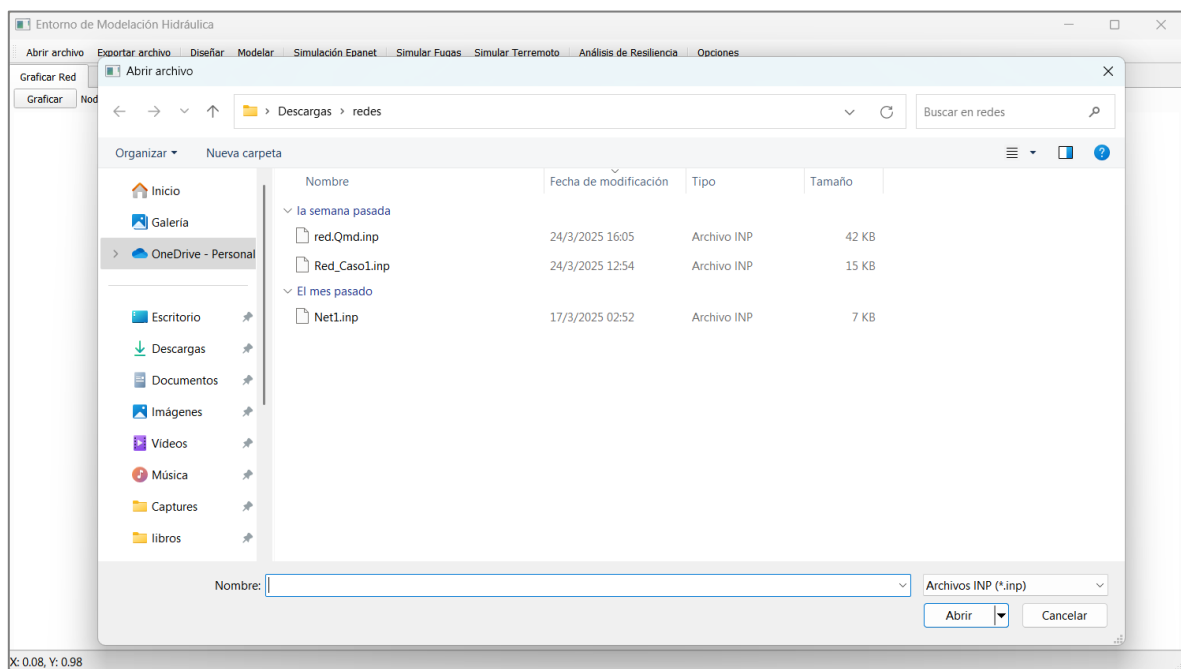
A continuación, se presenta el diseño final de cada uno de los módulos desarrollados para el entorno de modelación hidráulica.

4.2.1. Abrir Archivo

En la Figura 13 se muestra la ventana de selección de archivos, donde el usuario puede explorar y elegir la carpeta que contiene la red a cargar en formato .inp, utilizados por EPANET, o en formato .xlsx, compatibles con hojas de cálculo.

Figura 13.

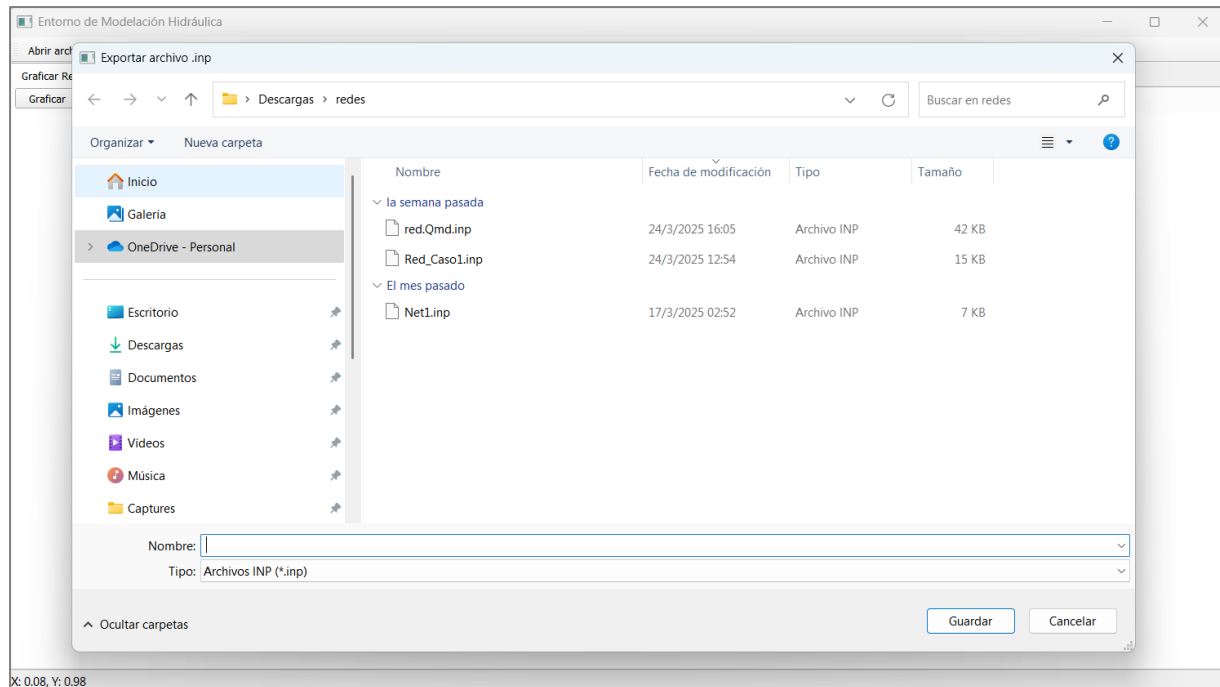
Ventana de selección de archivo de la red a cargar



Nota: Ventana para seleccionar y cargar archivos de red (.inp, .xlsx), facilitando la importación de datos al sistema para su modelación y análisis.

4.2.2. Exportar Archivo

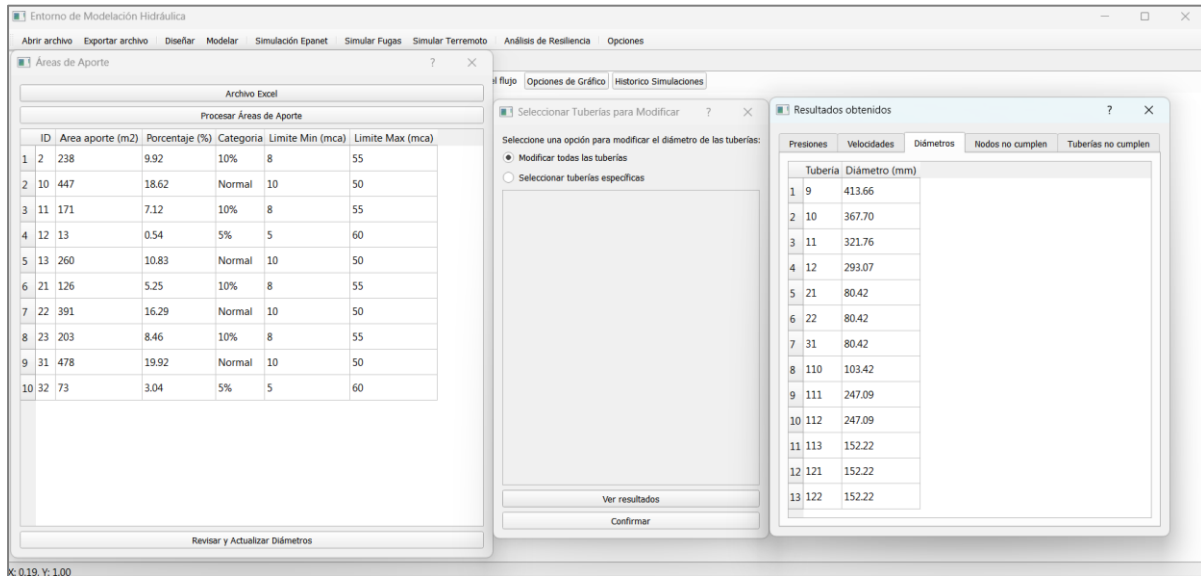
En la Figura 14 se muestra la ventana de guardado de archivos, donde el usuario puede exportar la configuración y datos del modelo hidráulico en un archivo con formato .inp.

Figura 14.*Ventana de exportación del archivo de la red*

Nota: Ventana para exportar archivos de red (.inp, .xlsx), permitiendo guardar los modelos generados o modificados en el sistema.

4.2.3. Diseñar

En la Figura 15 se muestra el flujo de trabajo del módulo Diseñar. Al acceder a este módulo, se abre la ventana 'Áreas de Aporte', donde se procesan los datos de la red y se establecen los límites mínimos y máximos de presión para cada nodo, conforme a las Resoluciones 0330 de 2017 y 799 de 2021. Una vez procesadas las áreas, se procede a la revisión y actualización de los diámetros al acceder a la ventana 'Seleccionar Tuberías para Modificar'. En esta ventana, el usuario puede optar por modificar los diámetros de todas las tuberías de la red o ajustar únicamente un conjunto específico.

Figura 15.*Flujo de ejecución del módulo Diseñar*

Nota: En la figura se muestra el flujo de trabajo que se debe seguir al utilizar el módulo Diseñar, se observan las ventanas que se generan después de procesar los datos.

4.2.4. Modelar

Al utilizar el módulo Modelar, se despliega una ventana que permite al usuario modificar los parámetros de la red de acuerdo con las necesidades de esta (Figura 16). En esta ventana, se selecciona el tipo de elemento (Conexiones o Tuberías) y luego el parámetro a modificar, como la Demanda en nodos o la Rugosidad en tuberías. La modificación se puede aplicar a todos los elementos o solo a un subconjunto, se introduce el nuevo valor y se confirma la modificación. Además, se pueden revisar las características de los parámetros antes y después de confirmar.

Finalmente, se pueden revisar los patrones de consumo disponibles y editar sus factores de variación en el tiempo. Esto resulta especialmente útil para modelar la variación de la demanda a lo largo del día o en distintos escenarios operativos.

Figura 16.*Ventana modelar elementos de la red*

Modelar elementos de la red ? X

Elemento:
Conexiones

Parámetro:
Demanda

Seleccionar elementos

☒ Todos los elementos ☐ Elementos específicos

Nuevo valor:

Ver características

Gestionar patrones de consumo

Confirmar

Nota: Ventana para realizar ajustes en los parámetros de la modelación según los requisitos hidráulicos de la red.

4.2.5. Simulación Epanet

Este módulo procesa el modelo cargado mediante el motor de simulación de EPANET, reconocido internacionalmente por su precisión y robustez en el cálculo de redes hidráulicas. Durante la ejecución, se determinan variables clave como presiones, demandas, caudales y velocidades en los elementos de la red.

4.2.6. Simular Fugas

Este módulo permite configurar escenarios de fugas en la red para evaluar su comportamiento ante estas fallas. En la interfaz (figura 17) se muestra la lista de tuberías de la

red para seleccionar aquellas en las que ocurrirán fugas, los campos de ingreso de la presión mínima y la presión requerida, valores para determinar si la red mantiene su estabilidad operativa, el diámetro de la fuga, ya sea de manera individual para cada tubería o de forma global para toda la red, por último, el horario de ocurrencia del evento, configurando un único rango de tiempo para todas las fugas o asignando intervalos específicos a cada tubería.

Figura 17.

Interfaz para configurar fugas en la red

Configurar Fugas

Seleccione las tuberías donde ocurrirán las fugas:

10
11
12
21
22
31
110
111
112
113
121

Presión requerida (mca):
Ejemplo: 15

Presión mínima (mca):
Ejemplo: 0

Diámetro de fuga para cada tubería seleccionada (mm):
Ejemplo: 10, 14, 20 (separado por comas)

☒ Una misma hora de inicio y fin para todas las fugas
☐ Horas individuales por tubería

Inicio (Horas) Fin (horas)

Confirmar

Nota: Interfaz para la configuración de fugas ajustando los distintos parámetros para modelar las fugas y simular su impacto en la red.

4.2.7. Simular Terremoto

El módulo Simular Terremoto permite evaluar el comportamiento de la red hidráulica ante un evento sísmico, modelando la generación de daños estructurales (fugas) y su proceso de reparación. Al acceder a este módulo, se despliega una ventana de configuración (Figura 18), donde el usuario debe especificar características clave del evento sísmico.

Posteriormente, se establecen condiciones hidráulicas críticas, como la presión requerida, que representa el umbral mínimo para que la red continúe operando correctamente, y la presión mínima, que indica el límite inferior por debajo del cual se considera que la red ha fallado.

También se configura la generación de las fugas en la red, representando el daño causado por el terremoto en la misma, y las estrategias de reparación que se van a implementar.

Finalmente, se escoge el modelo estadístico para la distribución del daño con base a una curva de fragilidad, y se ingresan los valores asociados a estas funciones, estos valores determinan la probabilidad de falla o daño en las tuberías, luego, el cálculo se determina en función en la relación entre la tasa de reparación y la longitud de la tubería afectada ($RR * L$) o de la aceleración máxima del suelo como indicador de impacto sísmico (PGA).

Tras la simulación, el menú Fugas Generadas muestra una tabla con cada fuga identificada y su demanda en LPS. Esta lista permite evaluar la severidad de los daños al ordenar las fugas de mayor a menor impacto.

Figura 18.*Interfaz para configurar evento sísmico en la red*

Simulación de Terremoto

Epicentro X:
Ejemplo: 32

Epicentro Y:
Ejemplo: 15

Magnitud (Richter):
Ejemplo: 6.5

Profundidad (m):
Ejemplo: 10000

Duración de la simulación (horas):
Ejemplo: 24

Presión requerida (mca):
Ejemplo: 14.06

Presión mínima (mca):
Ejemplo: 3.52

Tiempo de inicio de fugas (Horas):
Ejemplo: 5

Tiempo de reparación de fugas (Horas):
Ejemplo: 15

Cantidad de fugas a reparar:
Ejemplo: 4

Función probabilística:
Exponencial

Factor de forma para estado daño menor:
Ejemplo: 0.5

Factor de escala para estado de daño menor:
Ejemplo: 0.2

Factor de forma para estado de daño mayor:
Ejemplo: 0.5

Factor de escala para estado de daño mayor:
Ejemplo: 0.2

Método de probabilidad de daño:
RR * L

Confirmar datos Simular Ver fugas

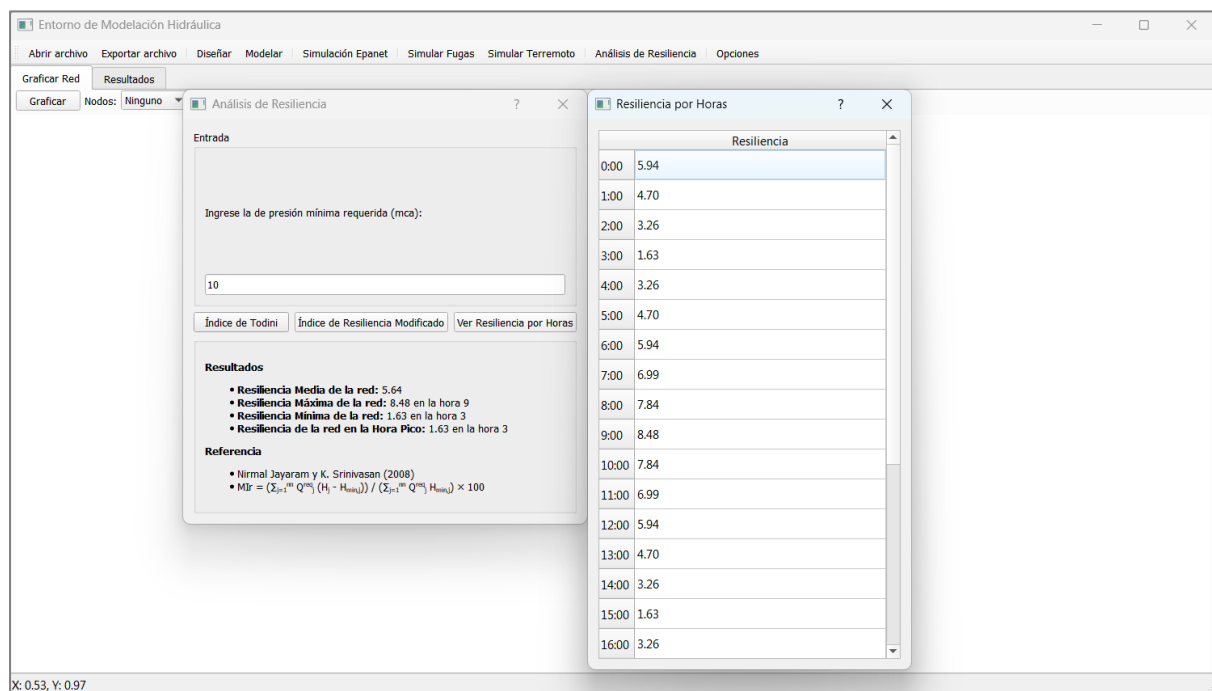
Nota: Interfaz para la configuración de eventos sísmicos ajustando las distintas características de este para poder generarlo y simular su impacto en la red.

4.2.8. Análisis de Resiliencia

El módulo Resiliencia permite evaluar la capacidad de la red para mantener un servicio adecuado en condiciones normales y su adaptación ante eventos disruptivos. Al ejecutarlo, se despliega la ventana “Análisis de resiliencia” mostrada en la Figura 19, donde se ingresa la presión mínima aceptable para garantizar el funcionamiento óptimo del sistema, con este se pueden realizar los cálculos y análisis mediante el Índice de Todini e Índice de Resiliencia Modificado y los resultados obtenidos se presentan como se observa en la en la figura 19.

Figura 19.

Interfaz para el análisis de la resiliencia



Nota: Menú para el análisis de la resiliencia de la red, por medio del cálculo del Índice de Todini o del Índice de Resiliencia Modificado.

4.2.9. Opciones

El módulo Opciones permite modificar los parámetros hidráulicos y de tiempo de la simulación. Al ejecutarlo, se despliega una ventana (figura 20) con dos pestañas principales y un botón "Guardar" para confirmar los cambios. En la pestaña Opciones Hidráulicas, se pueden

ajustar los parámetros hidráulicos de la simulación y en la pestaña Opciones de Tiempo, se pueden ajustar los parámetros temporales de la simulación.

Figura 20.

Ventana para la configuración de las opciones del modelo de la red

Propiedad	Valor
Unidades del Archivo .INP	LPS
Fórmula de Pérdida de Carga	H-W
Patrón de Demanda	1
Multiplicador de Demanda	1.0

Guardar

Nota: Ventana para la configuración las opciones hidráulicas y temporales que definen el comportamiento de la simulación.

4.3. Evaluación de casos en el entorno de modelación hidráulica

4.3.1. Evaluación caso Net1

En la tabla 2 se presentan los valores máximos y mínimos de presión y velocidad en la red original, En estos resultados se observa que, aunque los valores de velocidad cumplen con los límites, los valores de presión no cumplen con los requerimientos, saliéndose de los rangos permitidos establecidos en el artículo 62 de las Resolución 0330 del 2017.

Tabla 2.

Valores de presión y velocidad para el diseño original de la red Net1

Diseño original		
Parámetro	Mínimo	Máximo
Presión (mca)	75.13	94.18
Velocidad (m/s)	0.00	0.83

Las figuras 21 y 22 muestran los mapas de presión y velocidad de la red original en la hora 3, tras la simulación hidráulica. Se observa que la presión en la red presenta variaciones considerables, con valores elevados en ciertos puntos y una distribución heterogénea. En cuanto a las velocidades, la red opera dentro de rangos aceptables, aunque se evidencian tramos con valores cercanos a los límites establecidos, lo que indica posibles restricciones en el flujo.

Figura 21.

Mapa de presiones en la red Net1 original

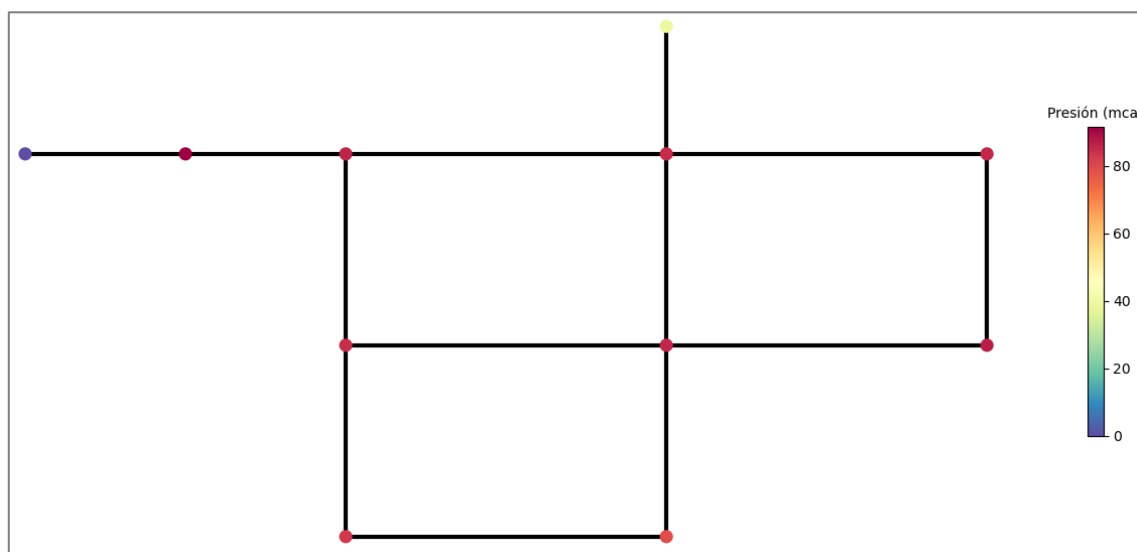
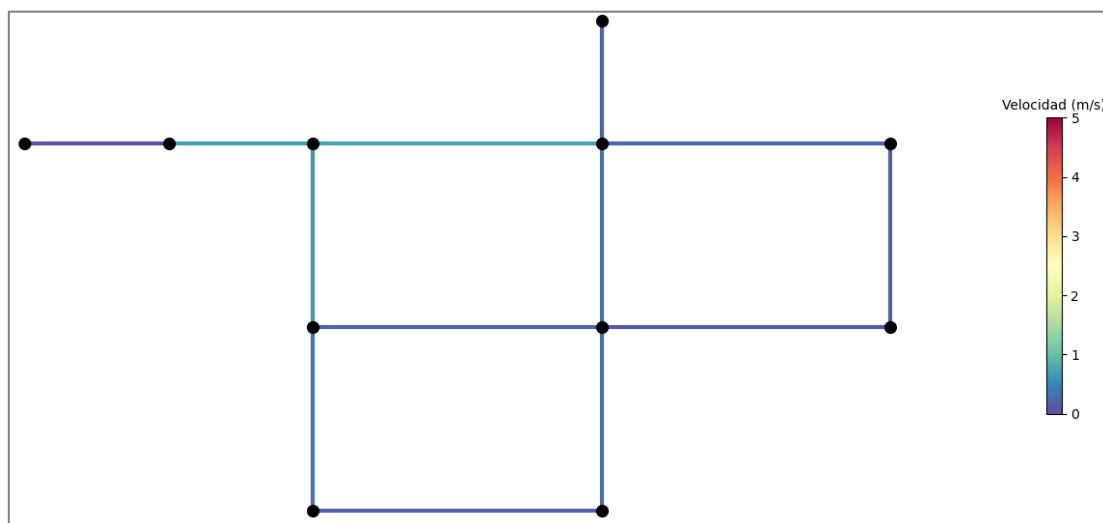


Figura 22.*Mapa de velocidades en la red Net1 original*

Tras completar el rediseño, los diámetros finales que se adoptaron para las tuberías se presentan en la Tabla 3, mientras que las tuberías no modificadas conservaron un diámetro de 80.42 mm (3").

En este rediseño, se priorizó la eficiencia hidráulica, asegurando que las tuberías principales contaran con diámetros adecuados para manejar altos caudales con bajas pérdidas de carga. Se observa que los tramos más críticos dentro de la red fueron dimensionados con diámetros significativamente mayores, garantizando así un adecuado transporte del caudal sin comprometer las presiones en los diferentes puntos de demanda.

Las tuberías secundarias y terciarias, en cambio, fueron diseñadas con diámetros menores, en función de la reducción progresiva de los caudales a medida que el agua se distribuye a las zonas de consumo. Este ajuste permite optimizar costos de instalación y operación, evitando sobredimensionamientos innecesarios y mejorando la eficiencia global del sistema.

Tabla 3.*Diámetros adoptados para las tuberías de la red Net1*

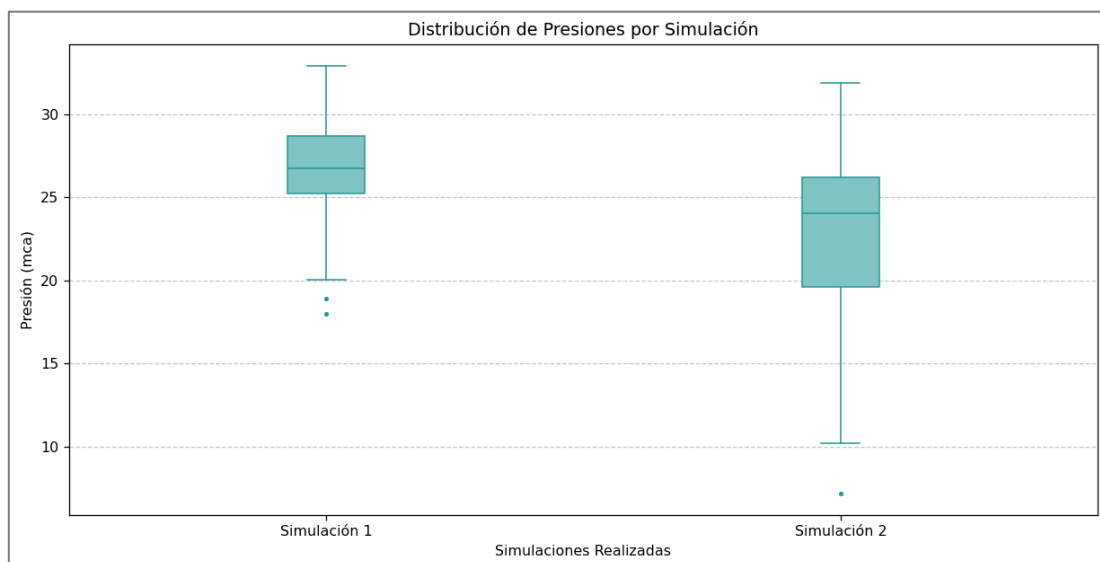
Tubería	Diámetro (")	Diámetro (mm)
9	18	413.66
10	16	367.70
11	14	321.76
12	12	293.07
110	4	103.42
111	10	247.09
112	10	247.09
113	6	152.22
121	6	152.22
122	6	152.22

Posteriormente, se realizó una simulación hidráulica para cada escenario, obteniendo las presiones y velocidades en la red. En las figuras 23 y 24 se presentan las comparativas de los resultados entre cada escenario, la Simulación 1 corresponde al primer diseño, el cual emplea tuberías de mayor diámetro con un coeficiente de rugosidad de 100, mientras que la Simulación 2 representa el segundo diseño, que utiliza tuberías de menor diámetro con un coeficiente de rugosidad de 140.

Al observar la figura 23, se evidencia que los valores de presión en el segundo diseño presentan una mayor dispersión en comparación con el primer diseño, lo que indica una variabilidad más alta en la red. Aunque las presiones disminuyeron ligeramente en la Simulación 2, estas se mantienen dentro de los límites establecidos por la normativa, por lo que el diseño sigue siendo adecuado. Además, se observan valores atípicos en ambas simulaciones, lo que sugiere la existencia de puntos específicos con presiones menores al promedio, indicando que en ciertos nodos se cuenta con presiones cercanas al límite mínimo permisible de 5 mca.

Figura 23.

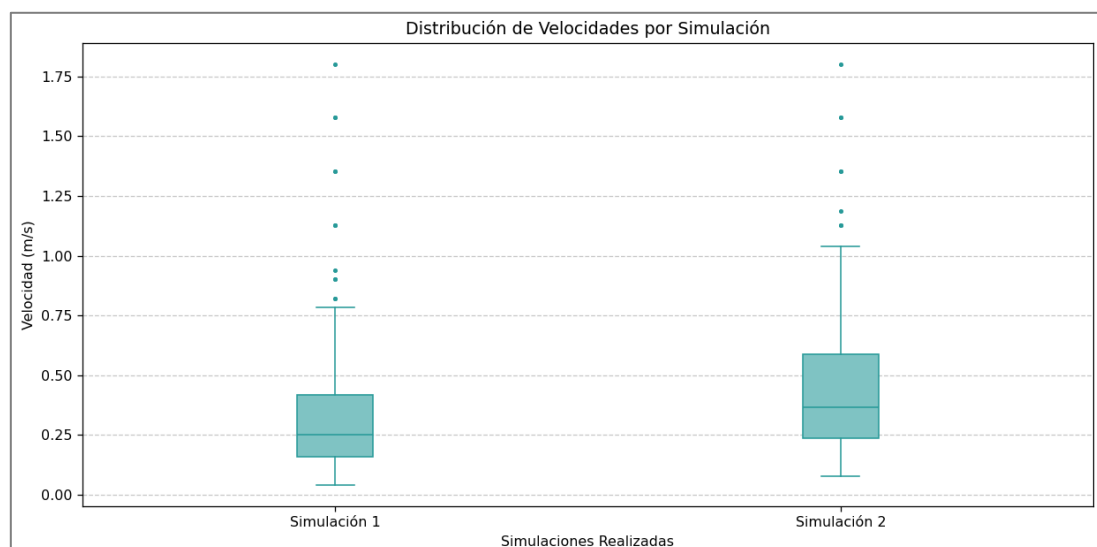
Rango de presiones registradas en la simulación para cada diseño de la red Net1



En la figura 24 se muestra la comparativa de las velocidades. En ambos casos, los valores cumplen con los requisitos normativos; sin embargo, en el segundo diseño se evidencia un incremento en las velocidades con respecto al primer diseño, y, una disminución en el número de valores atípicos. Esto debido en gran parte a la reducción en los diámetros de las tuberías.

Figura 24.

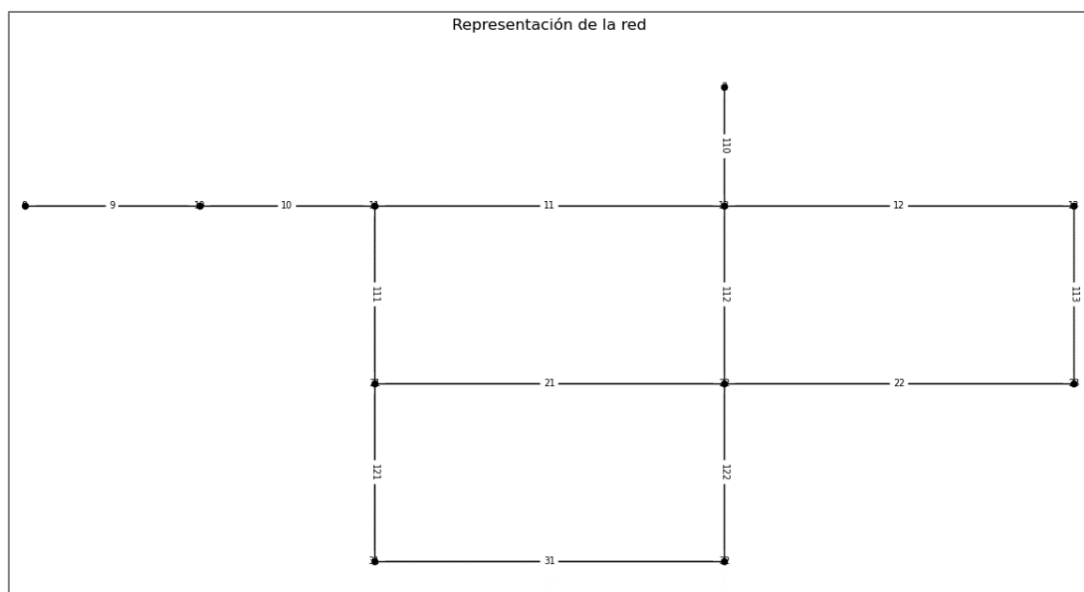
Rango de velocidades registradas en la simulación para cada diseño de la red Net1



En la figura 25 se muestra la representación dentro del entorno de la red con las etiquetas para los nodos y tuberías. En esta se aprecia la distribución de la red y la forma en que los elementos están conectados entre sí.

Figura 25.

Representación de la red Net1 después de haber sido rediseñada

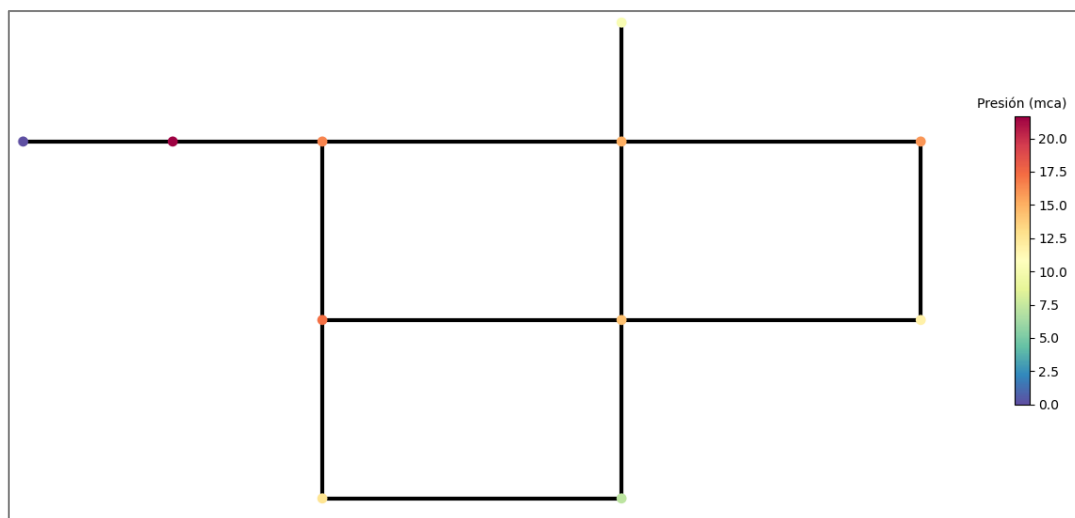


Las figuras 26 y 27 presentan los mapas de presión y velocidad en la red de distribución durante la hora 3, el momento de máxima demanda.

En la figura 26, se observa la distribución de presiones en los nodos. Las zonas con menor presión se encuentran en la parte superior y en la esquina inferior derecha de la red, coincidiendo con las áreas que requieren menor abastecimiento y donde los diámetros de las tuberías son menores.

Figura 26.

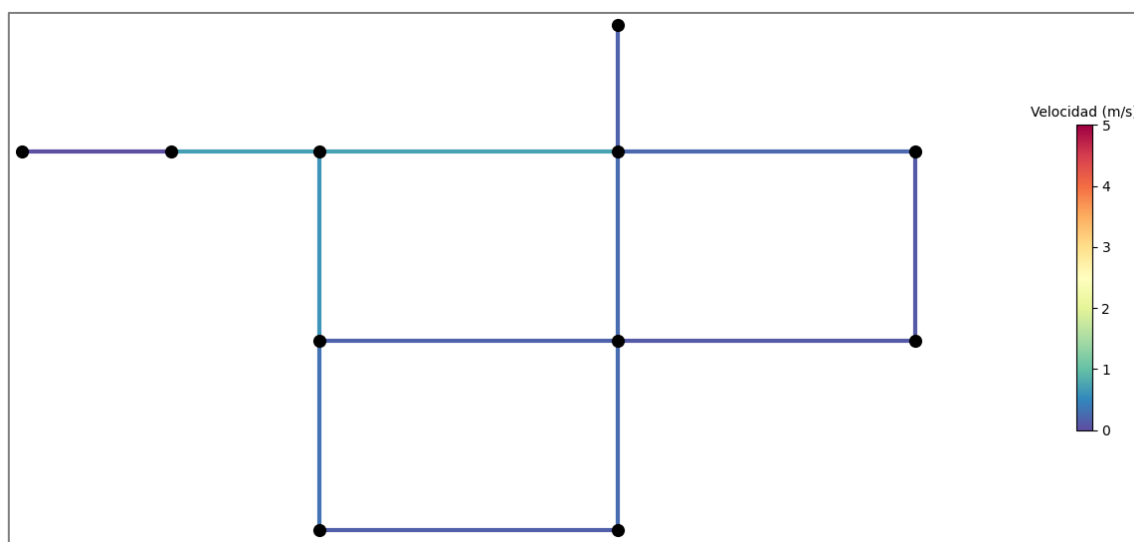
Mapa de presiones en la red Net1 rediseñada



Por su parte, la figura 27 muestra las velocidades en las tuberías. Se evidencia que las velocidades más altas se encuentran en la parte izquierda de la red y disminuyen gradualmente hacia la derecha.

Figura 27.

Mapa de velocidades en la red Net1 rediseñada



A continuación, en las figuras 28 y 29 se presentan las presiones y demandas en los nodos de la red, mientras que en las figuras 30 y 31 se muestran las velocidades y caudales en

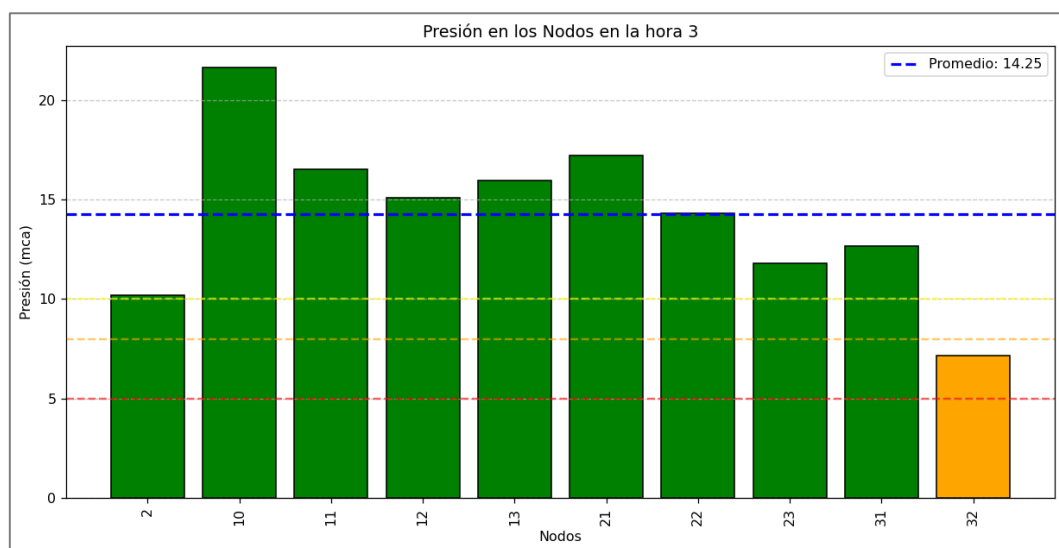
las tuberías. Todos estos parámetros corresponden a la hora 3, que representa el momento de máximo consumo.

En la Figura 28 se observa que la mayoría de los nodos presentan presiones entre 10 y 20 mca, con un valor promedio de 14.25 mca. El nodo con la presión más alta es el nodo '10', con 21.65 mca, mientras que el nodo con la presión más baja es el nodo '32', con 7.17 mca.

Las líneas de colores en el gráfico indican los valores mínimos admisibles establecidos por la normativa para poblaciones menores o iguales a 12500 habitantes: rojo para 5 mca, naranja para 8 mca y amarillo para 10 mca. Aunque el nodo '32' cumple con la presión mínima exigida por norma, se advierte que su valor se encuentra muy próximo al límite inferior recomendado.

Figura 28.

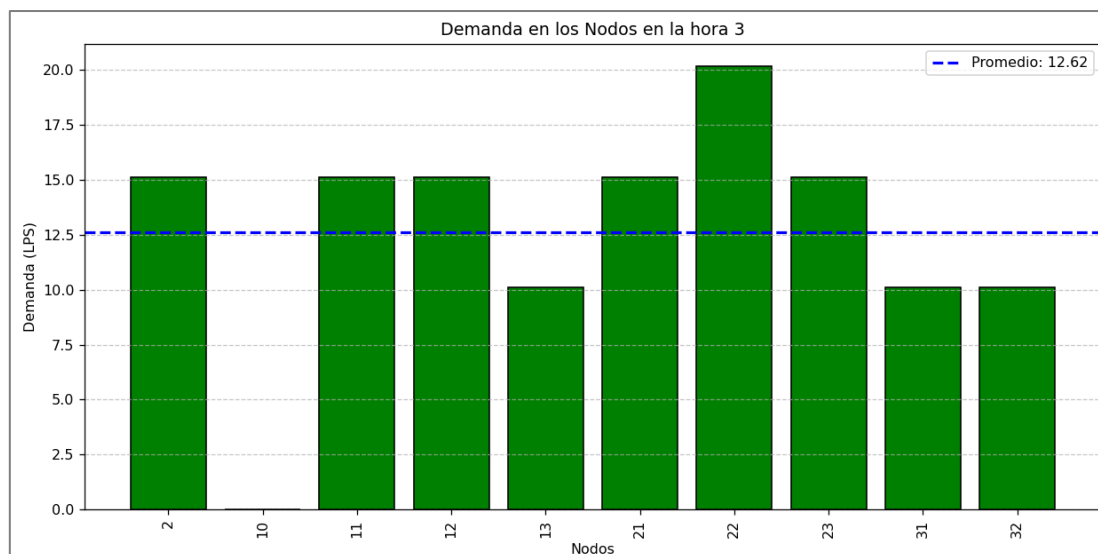
Distribución de presiones en los nodos en la hora 3 para la red Net1



En la Figura 29, la demanda en los nodos varía entre 10 y 20 LPS, con un promedio de 12.62 LPS, la mayoría de los nodos se encuentran próximos a este valor promedio, aunque existen algunas variaciones puntuales. El nodo '22' presenta el valor más alto, alcanzando los 20.19 LPS, lo que sugiere que abastece una zona con alta necesidad de consumo, mientras tanto, los nodos con menor demanda son el '13', '31', '32', cada uno con un valor de 10.09 LPS.

Figura 29.

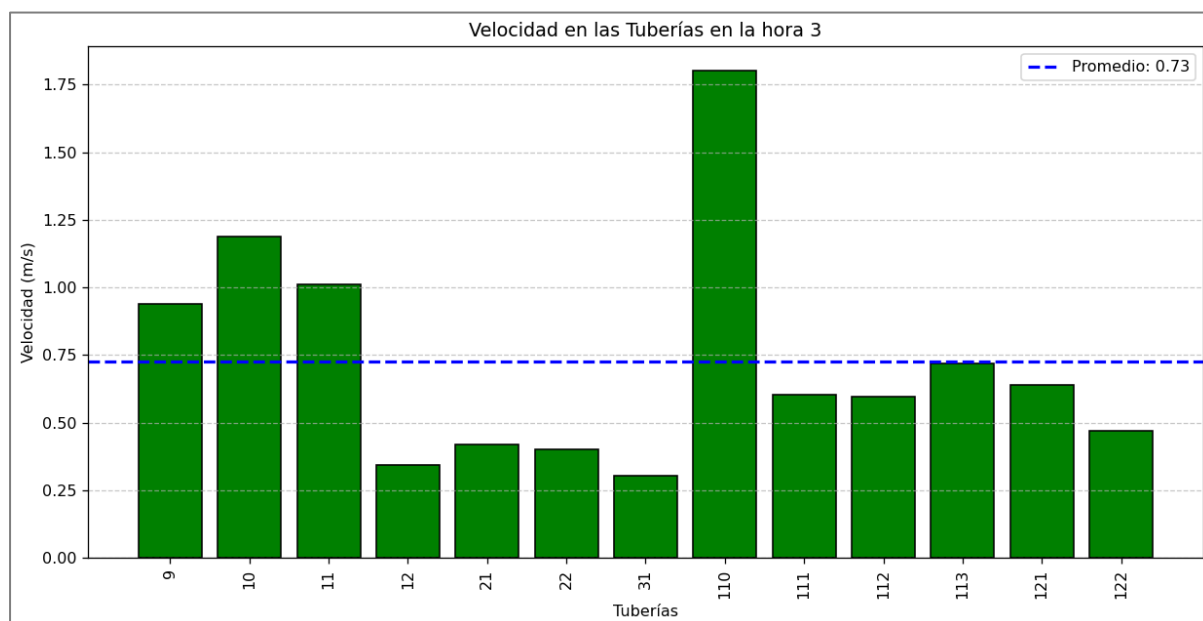
Distribución de demandas en los nodos en la hora 3 para la red Net1



La Figura 30 muestra la velocidad en las tuberías, donde el valor promedio es de 0.73 m/s. La mayoría de las tuberías operan con velocidades menores a 1 m/s y se destaca la tubería ‘110’, que presenta la velocidad más alta con un valor de 1.80 m/s, mientras que la tubería con la menor velocidad es la ‘31’, con 0.30 m/s.

Figura 30.

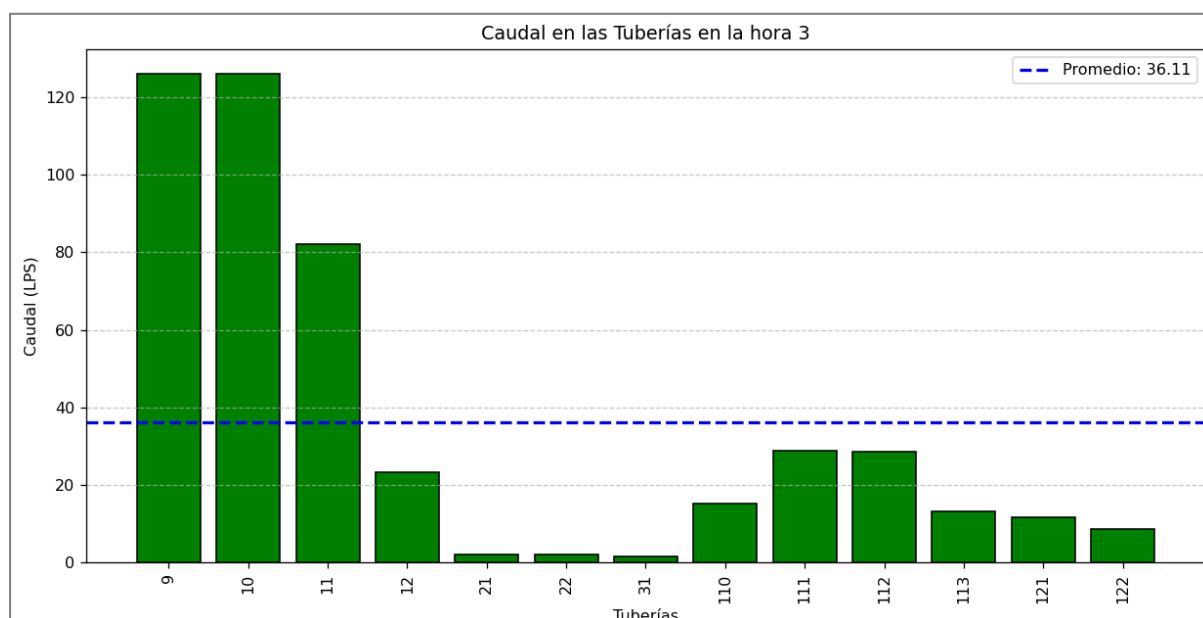
Distribución de velocidades en las tuberías en la hora 3 para la red Net1



En la Figura 31 se presentan los caudales en las tuberías, donde el valor promedio de la red es de 36.11 LPS. Sin embargo, algunas tuberías superan ampliamente este promedio. Se destacan las tuberías ‘9’ y ‘10’, que transportan aproximadamente 126.19 LPS, y la tubería ‘31’, con un caudal significativamente menor de 1.54 LPS. La mayoría de las tuberías restantes presentan caudales en torno a los 30 LPS o menos. Los altos caudales observados en ciertos tramos indican que estas tuberías funcionan como arterias principales de la red.

Figura 31.

Distribución de caudales en las tuberías en la hora 3 para la red Net1



Métricas de resiliencia

Los valores de las métricas de resiliencia calculadas utilizando el Índice de Todini se presentan en la Tabla 4. Al analizar estos datos, se observa que la red tiene una resiliencia media de 0.62, lo cual, según la literatura, indica que la red es resiliente, ya que supera el valor mínimo de 0.5 requerido para ser considerada tal. Durante la hora 9, la red presenta una resiliencia muy elevada (0.94), acercándose al límite máximo teórico de 1; este valor sugiere que en ese período la red puede manejar de manera óptima las posibles fallas y mantener el servicio. Por otro lado, en la hora 3 se registra la resiliencia mínima, con un valor de 0.18, coincidiendo con el pico de consumo o demanda. Este bajo valor indica una pérdida

significativa de resiliencia en ese instante, lo que se traduce en una mayor vulnerabilidad ante fallas y la posibilidad de que el sistema no cumpla con un servicio óptimo.

Tabla 4.

Cálculo de la resiliencia de la red Net1 mediante el Índice de Todini

Índice de Todini		
Métrica de resiliencia	Valor (-)	Hora
Resiliencia media	0.62	-
Resiliencia máxima	0.94	9
Resiliencia mínima	0.18	3
Resiliencia en la hora pico	0.18	3

En cuanto a las métricas de resiliencia calculadas utilizando el Índice de Resiliencia Modificada, cuyos resultados se muestran en la Tabla 5, se observa que los valores máximos, mínimos y de hora pico se presentan en las mismas horas que en el índice anterior, reafirmando el estado de la red en los distintos instantes. En promedio, la red dispone de un excedente de energía del 5.64%, alcanzando un máximo del 8.48% y un mínimo del 1.63% en los nodos de demanda. Estos valores demuestran que, en general, la red cuenta con suficiente energía adicional para afrontar fallas imprevistas y continuar satisfaciendo las demandas y manteniendo las presiones, o, al menos en forma parcial.

Tabla 5.

Cálculo de la resiliencia de la red Net1 mediante el Índice de Resiliencia Modificado

Índice de Resiliencia Modificado		
Métrica de resiliencia	Valor (%)	Hora
Resiliencia media	5.64	-
Resiliencia máxima	8.48	9
Resiliencia mínima	1.63	3
Resiliencia en la hora pico	1.63	3

Simulación de fuga

La Figura 32 muestra el mapa de presiones en la red durante la hora 3, que corresponde al momento de máxima demanda. Se observa una caída generalizada en las presiones de los

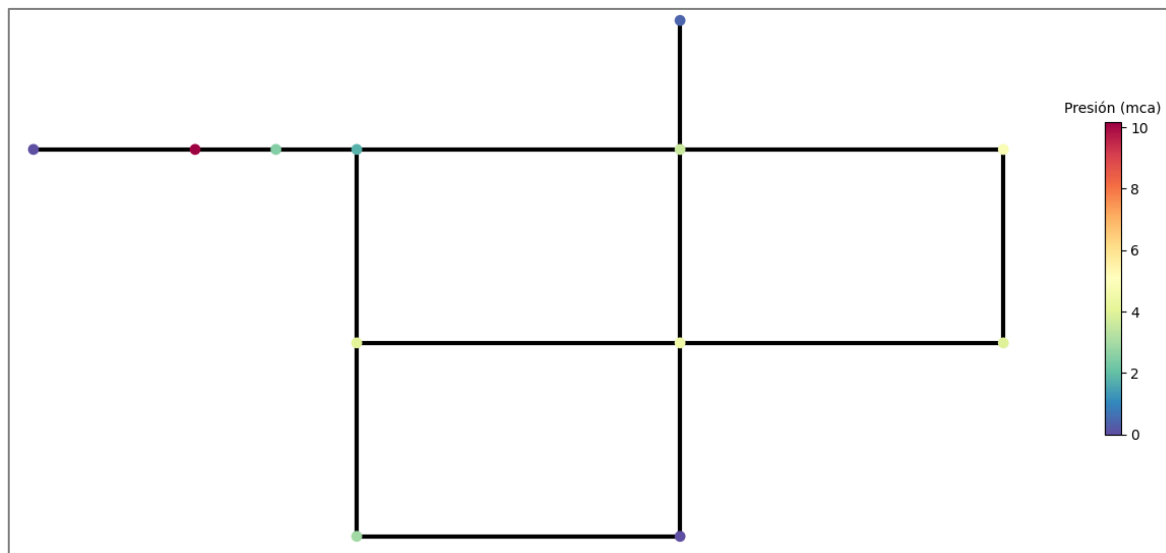
nodos, especialmente en aquellos más alejados de la fuente de abastecimiento. En el mapa se indica que las presiones más bajas se concentran en la zona derecha de la red, mientras que en los nodos intermedios las presiones permanecen en un rango medio.

Uno de los aspectos más relevantes es que, a pesar de la caída de presión en la red, el nodo de fuga mantiene valores relativamente altos. Esto sugiere que el flujo de agua se está desviando hacia la fuga, lo que provoca un déficit en la distribución del suministro hacia otras zonas.

Este comportamiento es indicativo de un problema de balance hidráulico en la red, donde la fuga genera un punto de atracción del flujo. La consecuencia inmediata es una reducción en la presión de servicio en nodos cercanos, lo que podría comprometer el abastecimiento en sectores críticos.

Figura 32.

Mapa de presiones en la red Net1 con presencia de fuga



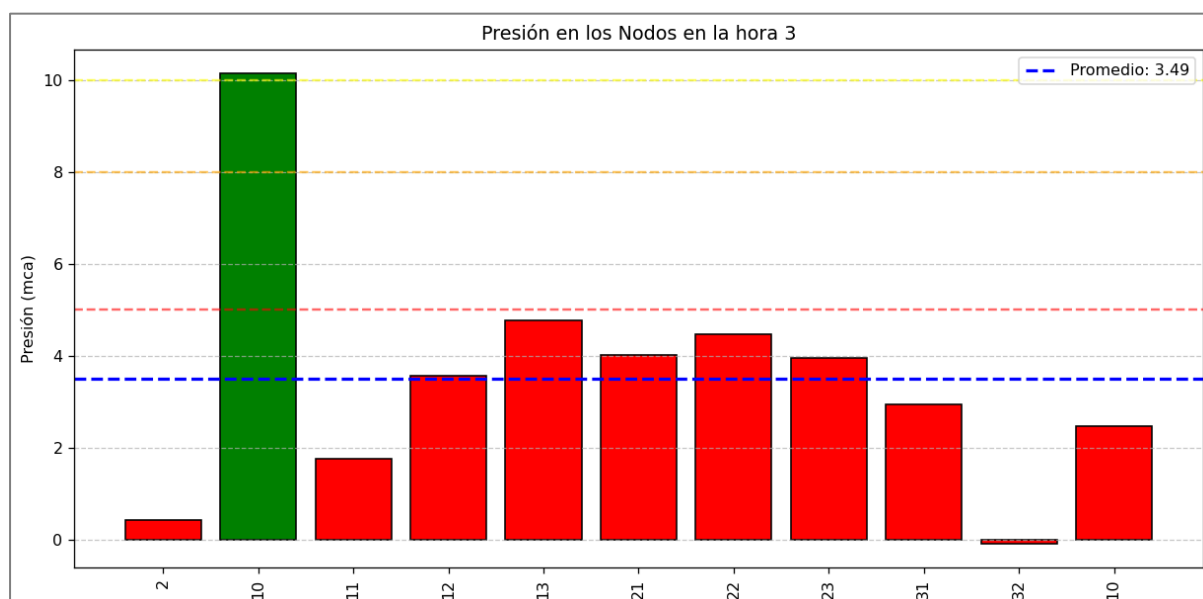
La Figura 33 muestra la distribución de presiones en la red en la hora 3, cuando la fuga sigue activa. Se observa que la mayoría de los nodos presentan presiones por debajo del umbral mínimo admisible de 5 mca lo que lleva a tener una presión promedio de 3.49 mca, lo que indica que el sistema no está logrando satisfacer las demandas de agua de manera óptima.

El nodo '10', ubicado antes de la tubería donde se originó la fuga, presenta una presión significativamente mayor que el resto de los nodos afectados. Sin embargo, su valor sigue siendo inferior al esperado en condiciones normales, lo que sugiere que la fuga está afectando la distribución del flujo en la red.

La diferencia de presiones entre los nodos refleja la influencia del evento disruptivo sobre el comportamiento hidráulico del sistema. La fuga actúa como un punto de atracción del caudal, reduciendo la presión en otras zonas y comprometiendo el abastecimiento. Esto es consistente con la observación previa en el mapa de presiones, donde se identificó un desbalance hidráulico.

Figura 33.

Distribución de presiones en los nodos de la red Net1 en la hora 3 con presencia de fuga



Simulación de terremoto

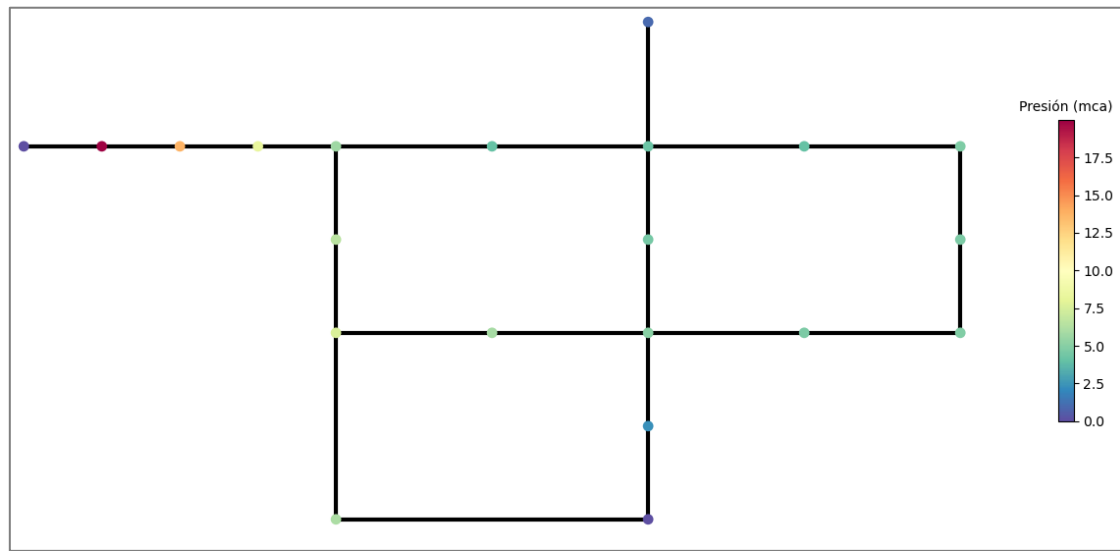
Las figuras 34 y 35 muestran los mapas de presión en la hora 24 sin aplicar reparaciones y al aplicar reparaciones, respectivamente.

En la Figura 34, se observa que el impacto del sismo fue severo, ya que en la mayoría de las tuberías se generaron fugas, lo que provocó una reducción significativa de presión en todos los nodos de la red. En particular, los nodos más alejados del punto de suministro

presentan presiones por debajo de 5 mca, lo que indica una afectación severa en la distribución del agua. Además, en los nodos cercanos al extremo izquierdo de la red, se registran presiones de 2 a 3 mca, lo que compromete el suministro en esa zona.

Figura 34.

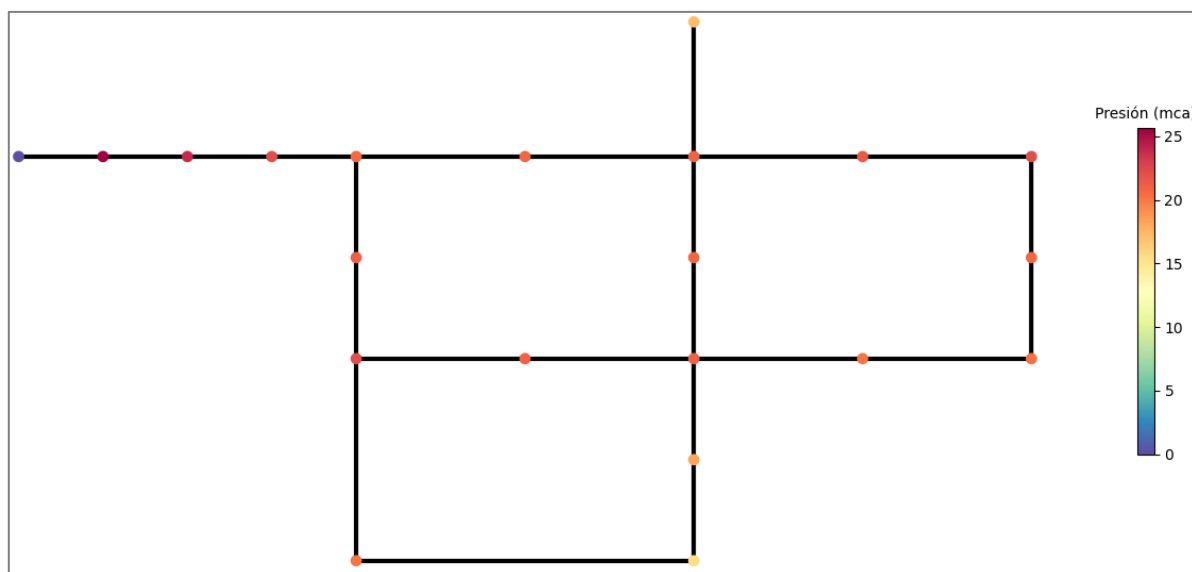
Mapa de presiones en la red Net1 en la hora 24 de la simulación del sismo sin aplicar reparaciones de fugas



En la Figura 35, tras la implementación de la reparación de fugas, se evidencia una mejora sustancial en las presiones de la red. La mayoría de los nodos presentan valores superiores a 15 mca, lo que indica una recuperación exitosa del sistema. Asimismo, los nodos más alejados del punto de suministro han recuperado presiones superiores a 10 mca, garantizando un nivel de servicio adecuado.

Figura 35.

Mapa de presiones en la red Net1 en la hora 24 de la simulación del sismo al aplicar reparación de fugas

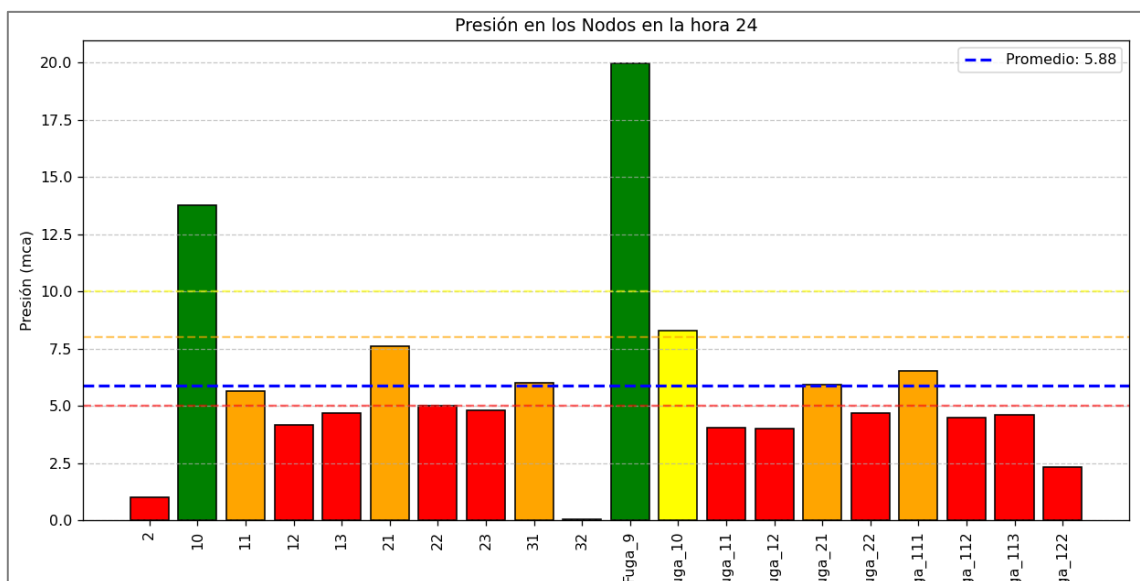


Las Figuras 36 y 37 muestran la distribución de presiones en los nodos de la red en la hora 24, sin aplicar reparaciones y al aplicar reparaciones, respectivamente.

En la Figura 36 se observa que, tras el evento sísmico, los nodos 2, 12, 13, 22 y 23 registran presiones inferiores a 5 mca, lo que indica una interrupción del servicio o una distribución deficiente del suministro. Por otro lado, los nodos 11, 21 y 31, aunque superan el umbral normativo mínimo de 5 mca, no alcanzan la presión mínima requerida de 10 mca, lo que sugiere un servicio parcial. En general, la presión promedio en la red se redujo a 5.88 mca, un valor que sigue por debajo del umbral necesario para garantizar una distribución eficiente del agua.

Figura 36.

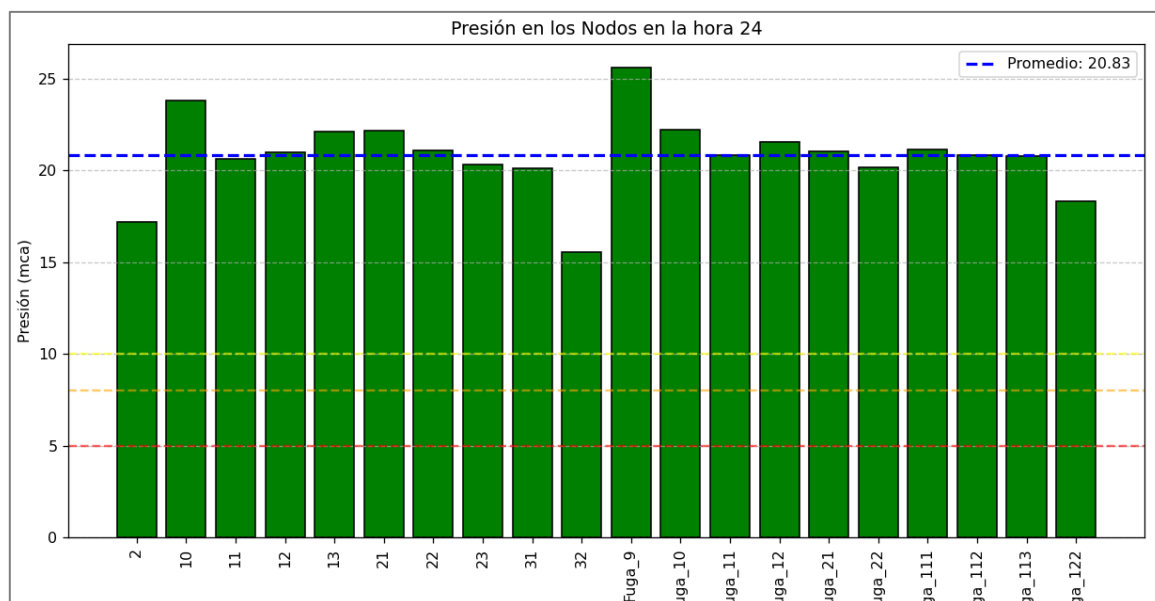
Distribución de presiones en los nodos de la red Net1 en la hora 24 de la simulación del sismo sin aplicar reparaciones de fugas



Por otro lado, en la Figura 37, tras la reparación de las fugas más severas, se observa una recuperación notable en las presiones de la red. La mayoría de los nodos alcanzan valores superiores a 20 mca, con un promedio de presión de 20.83 mca, lo que indica que la red ha sido restablecida a condiciones óptimas de operación. Nodos que previamente tenían presiones críticas ahora muestran valores dentro de rangos adecuados, asegurando una correcta prestación del servicio.

Figura 37.

Distribución de presiones en los nodos de la red Net1 en la hora 24 de la simulación del sismo al aplicar reparación de fugas



4.3.2. Evaluación caso Red_Caso1

Los diámetros finales adoptados para las tuberías se presentan en la Tabla 6, mientras que las tuberías no modificadas conservaron un diámetro de 80.42 mm (3"). Se observa que los tramos más críticos dentro de la red fueron dimensionados con diámetros mayores, garantizando así un adecuado transporte del caudal sin comprometer las presiones en los diferentes puntos de demanda.

Las tuberías secundarias y terciarias fueron diseñadas con diámetros menores, en función de la reducción progresiva de los caudales a medida que el agua se distribuye a las zonas de consumo. Este ajuste permite optimizar costos de instalación y operación, evitando sobredimensionamientos innecesarios y mejorando la eficiencia global del sistema.

Aunque las presiones mínimas requeridas se cumplían incluso con un menor número de tuberías modificadas, se optó por ajustar el diámetro de algunas tuberías adicionales para garantizar un mayor excedente de presión sobre el mínimo que establece la norma.

Tabla 6.*Diámetros adoptados para las tuberías de la red Red_Caso1*

Tubería	Diámetro (")	Diámetro (mm)
T-1	6	152.22
T-2	6	152.22
T-3	6	152.22
T-4	6	152.22
T-5	6	152.22
T-6	6	103.42
T-8	4	103.42
T-9	4	103.42
T-11	4	103.42

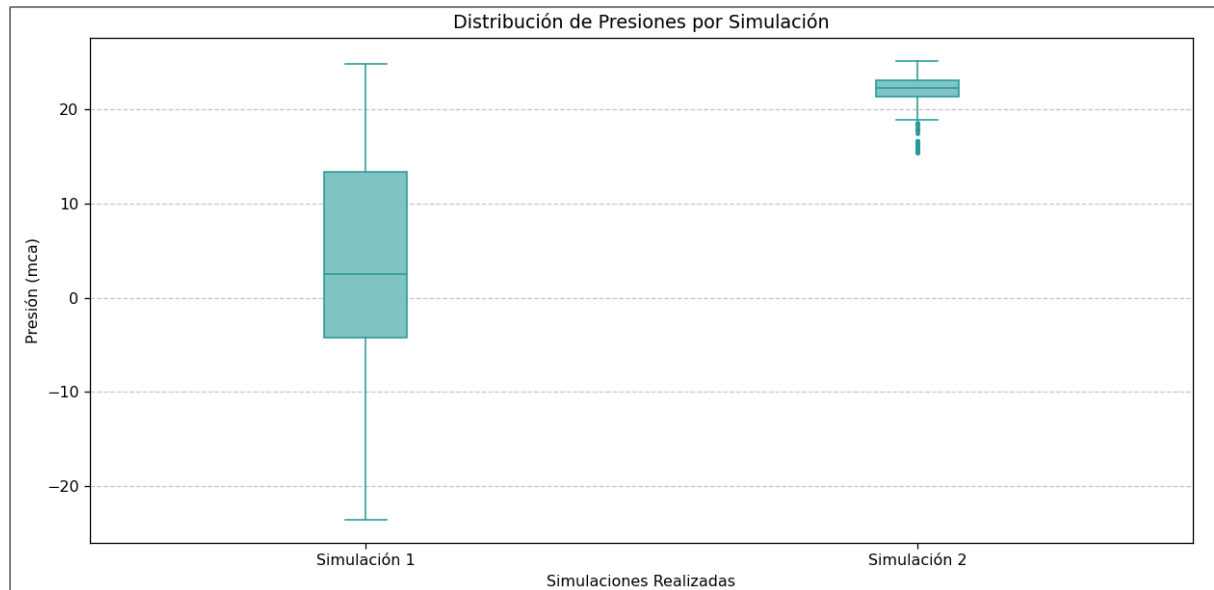
En la Figura 38, se presenta la comparación de las presiones entre la red sin diseñar y la red diseñada. La Simulación 1 representa la red antes de ajustar los diámetros de las tuberías, mientras que la Simulación 2 muestra la red con los diámetros corregidos.

En la Simulación 1, se observaron valores de presión que oscilan entre aproximadamente -22 mca y 22 mca, con una media cercana a 0 mca. Esto indica que algunos nodos experimentaron presiones negativas, lo que hacía inviable la implementación del diseño inicial debido a la imposibilidad de suministrar agua en esas condiciones.

Tras el ajuste de los diámetros en la Simulación 2, las presiones mejoraron significativamente, ubicándose dentro de un rango estable y positivo. Se observa que los valores se concentran entre aproximadamente 18 mca y 22 mca, sin presencia de presiones negativas. Esto confirma que las modificaciones aplicadas permiten cumplir con la normativa vigente en cuanto a presión mínima en la red de distribución.

Figura 38.

Rango de presiones registradas en la simulación después de diseñar la red Red_Caso1



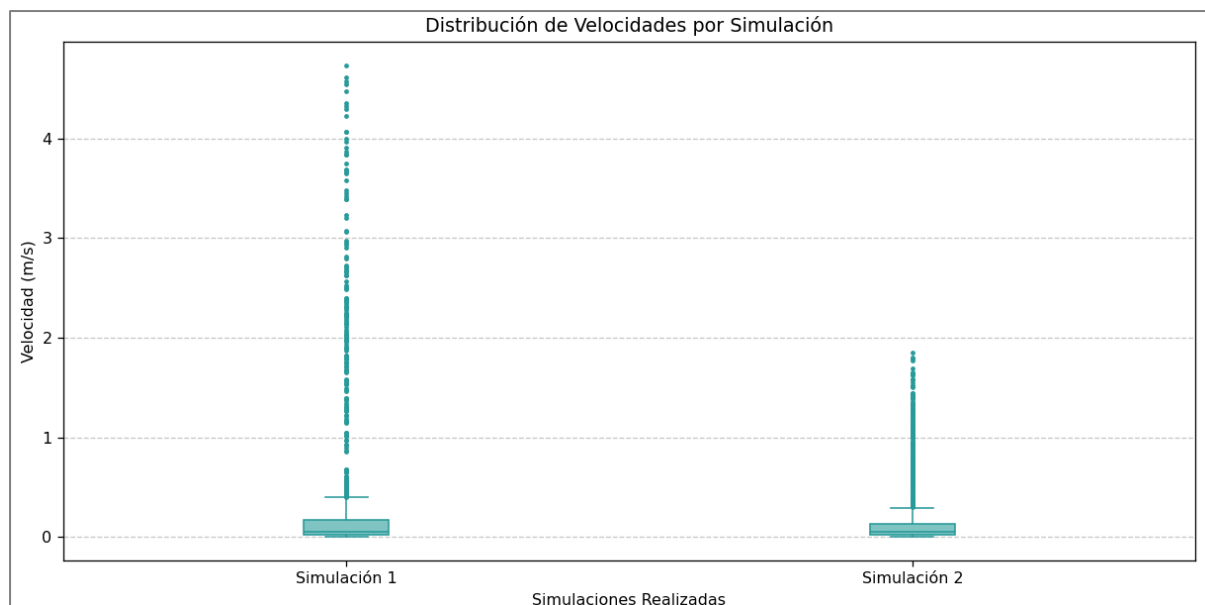
En la Figura 39, se muestra la comparativa de las velocidades en la red. En la Simulación 1, aunque los valores en general cumplen con los requisitos normativos, se observan numerosos valores atípicos que superan los 4 m/s.

En la Simulación 2, las velocidades se estabilizan dentro de un rango más controlado, reduciendo la frecuencia con la que se alcanzan valores elevados. Se observa que los valores se concentran en un rango menor, cumpliendo con la normatividad.

Estos resultados evidencian que el ajuste de los diámetros no solo corrigió las presiones negativas, sino que también contribuyó a un flujo más estable y controlado dentro de la red.

Figura 39.

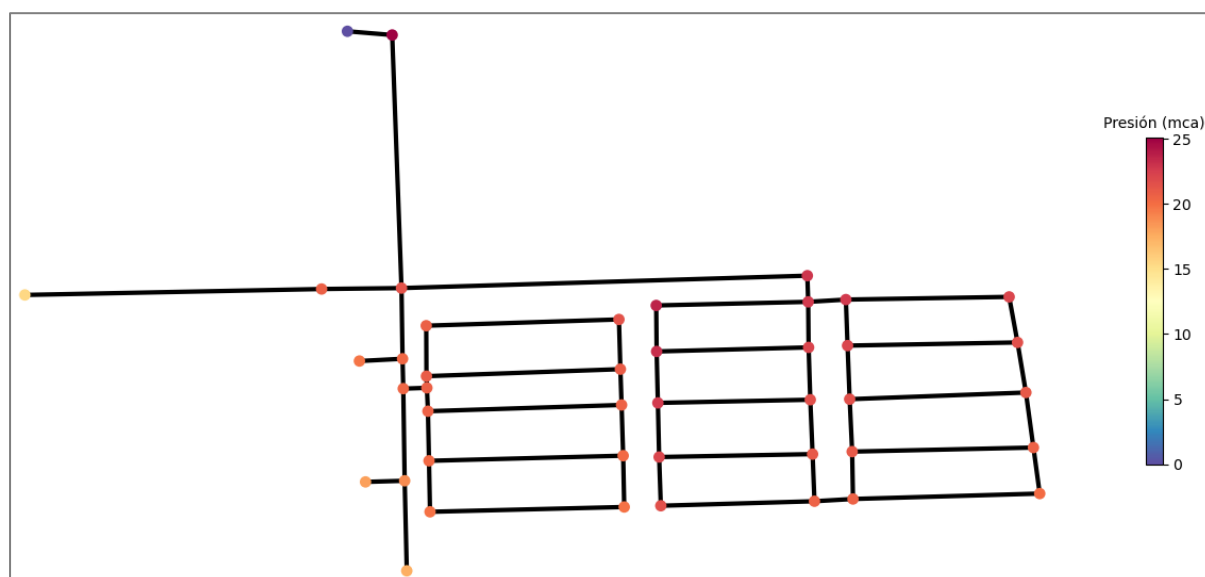
Rango de velocidades registradas en la simulación después de diseñar la red Red_Caso1



En la Figura 40, se observa la distribución de presiones en los nodos de la red en la hora 9, hora de máxima demanda. Las zonas con menor presión se encuentran en la parte superior izquierda y en algunos puntos de los extremos de la red, lo que coincide con las áreas más alejadas del punto de suministro. Estas variaciones también están influenciadas por el diámetro final de las tuberías.

Figura 40.

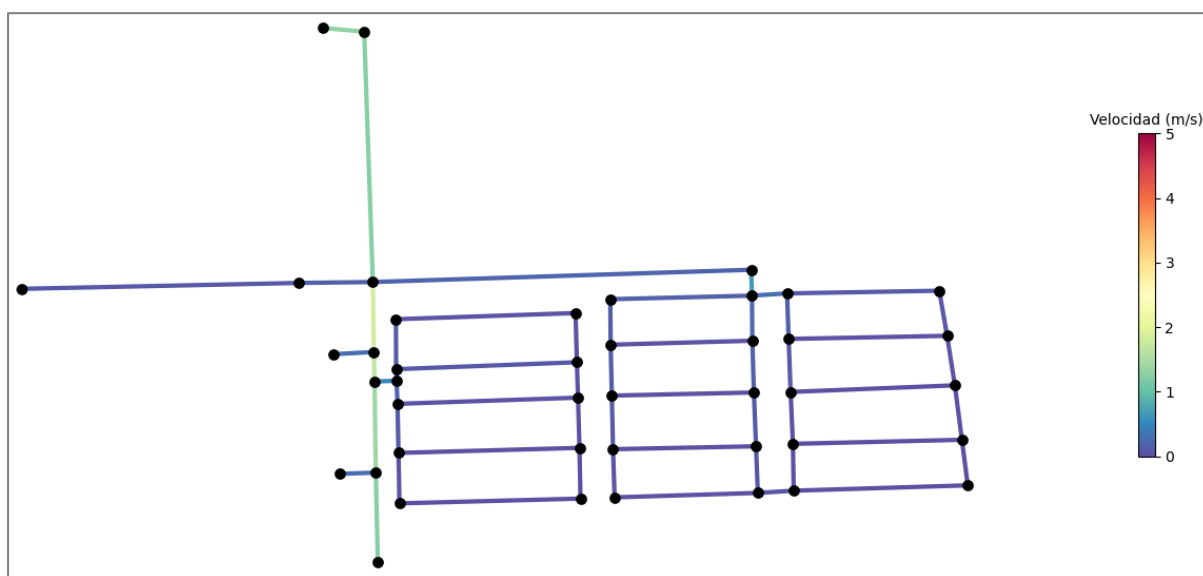
Mapa de presiones en la red Red_Caso1 diseñada



La Figura 41 muestra la distribución de velocidades en las tuberías en la hora 9. Se identifican mayores velocidades en la tubería vertical principal y en los primeros tramos de la red, lo que sugiere una mayor concentración del caudal en estas secciones antes de su distribución hacia los sectores internos. En las tuberías de los ramales, las velocidades son más uniformes y estables, lo que indica un flujo bien distribuido en las zonas de consumo.

Figura 41.

Mapa de velocidades en la red Red_Caso1 rediseñada

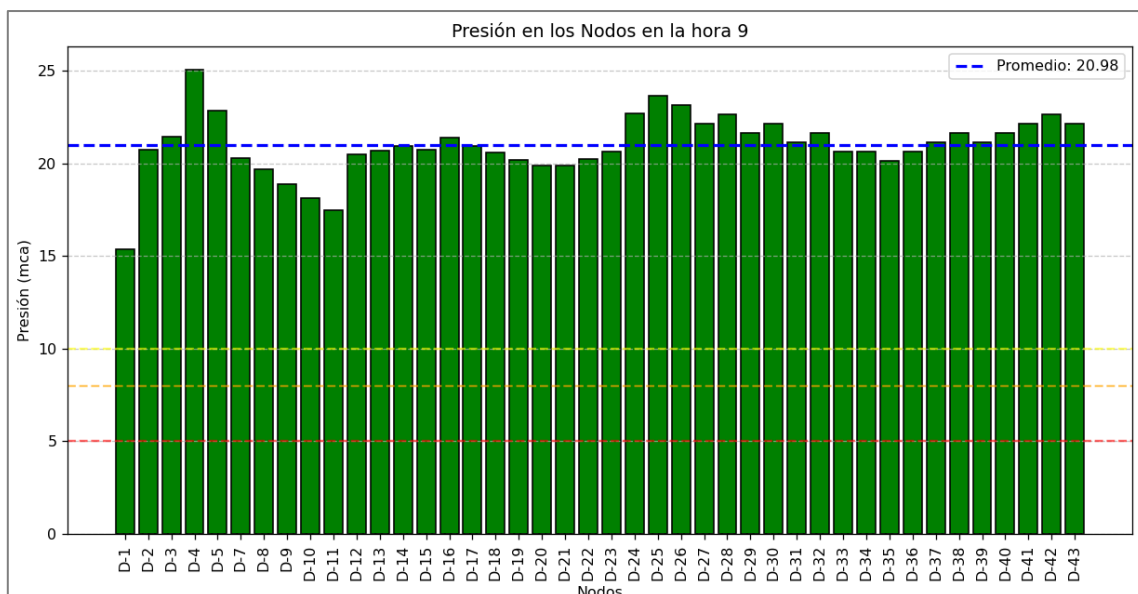


A continuación, en las figuras 42 y 43 se presentan las presiones y demandas en los nodos de la red, mientras que en las figuras 44 y 45 se muestran las velocidades y caudales en las tuberías. Todos estos parámetros corresponden a la hora 9, que representa el momento de máximo consumo.

En la Figura 42, se observa que todos los nodos presentan presiones superiores a 15 mca, con un valor promedio de 20.98 mca. El nodo con la presión más alta es el nodo 'D-4', con 25.06 mca, mientras que el nodo con la presión más baja es el nodo 'D-1', con un valor de 15.38 mca. Todos los nodos cumplen con los requisitos normativos, además de contar con excedencia de presiones lo que indica que la red garantiza un servicio adecuado en todas sus zonas.

Figura 42.

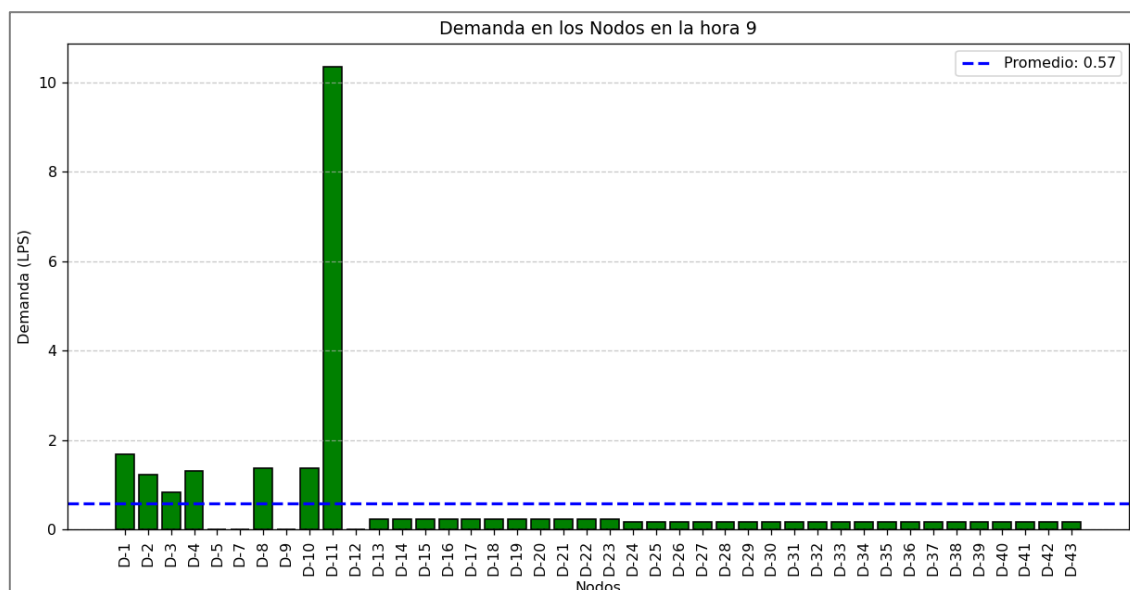
Distribución de presiones en los nodos en la hora 9 para la red Red_Caso1



En la Figura 43, se observa que la demanda en los nodos varía considerablemente, con un valor promedio de 0.57 LPS. La mayoría de los nodos presentan demandas bajas y cercanas al promedio, sin embargo, el nodo 'D-11' destaca con un valor de 10.36 LPS, lo que indica que abastece una zona con un consumo significativamente mayor en comparación con el resto de la red.

Figura 43.

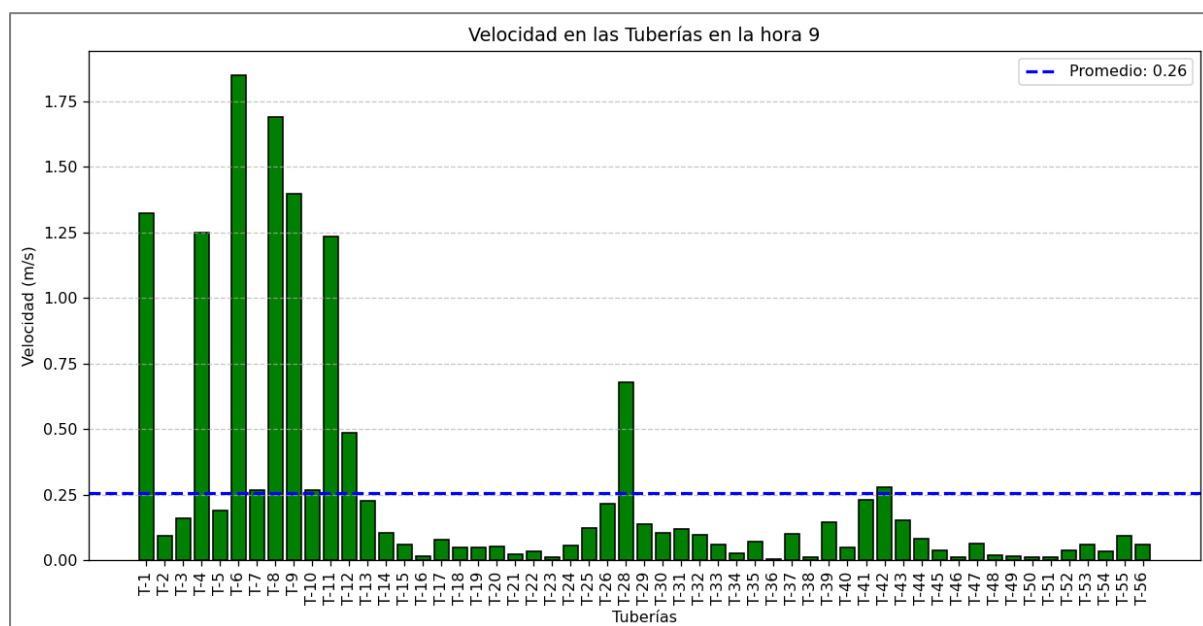
Distribución de demandas en los nodos en la hora 9 para la red Red_Caso1



En la Figura 44, se muestra la velocidad en las tuberías, con un valor promedio de 0.26 m/s. La mayoría de las tuberías operan con velocidades bajas, por debajo de 0.5 m/s, destacándose algunas con valores más elevados en la parte inicial de la red. La tubería ‘T-6’ presenta la mayor velocidad, alcanzando los 1.85 m/s, mientras que varias tuberías muestran valores cercanos a 0 m/s, lo que indica secciones con flujo muy reducido.

Figura 44.

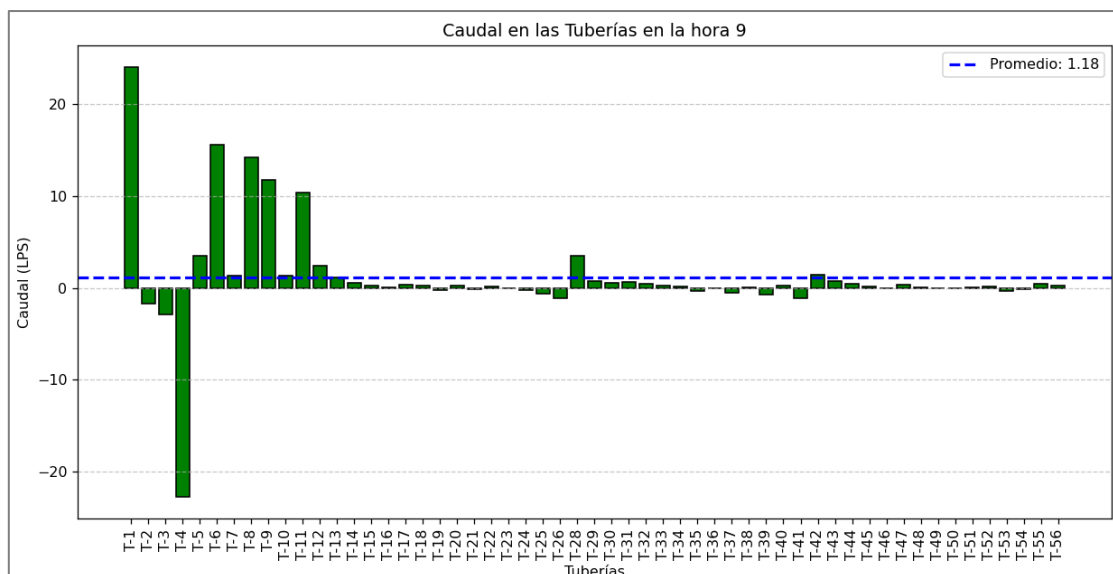
Distribución de velocidades en las tuberías en la hora 9 para la red Red_Caso1



En la Figura 45, se presentan los caudales en las tuberías, con un valor promedio de 1.18 LPS. Se observa una gran variabilidad en los caudales, con algunas tuberías transportando valores considerablemente mayores o menores al promedio. Se destaca la tubería ‘T-1’, que presenta un valor de 24.05 LPS, mientras que la tubería ‘T-4’ muestra un caudal negativo, lo que indica un cambio en la dirección del flujo. La mayoría de las tuberías restantes presentan caudales cercanos a 0 LPS, reflejando secciones con baja demanda o flujo reducido.

Figura 45.

Distribución de caudales en las tuberías en la hora 9 para la red Red_Caso1



Métricas de resiliencia

Los valores de las métricas de resiliencia calculadas utilizando el Índice de Todini se presentan en la Tabla 7. Al analizar estos datos, se observa que la red tiene una resiliencia media de 0.84, lo cual supera ampliamente el umbral de 0.5 citado en la literatura para considerarse resiliente. El valor máximo de resiliencia (0.94) se registra en la hora 2, muy cercano al límite teórico de 1, lo que sugiere que en ese período la red puede manejar fallas con gran eficacia y mantener el servicio sin interrupciones. Por otro lado, la resiliencia mínima (0.71) se presenta en la hora 9, coincidiendo con la hora pico de demanda. Aunque este valor es significativamente menor que el máximo, se mantiene por encima de 0.5, lo que indica que la red conserva un nivel de desempeño aceptable incluso en los momentos de mayor exigencia.

Tabla 7.

Cálculo de la resiliencia de la red Red_Caso1 mediante el Índice de Todini

Índice de Todini		
Métrica de resiliencia	Valor (-)	Hora
Resiliencia media	0.84	-
Resiliencia máxima	0.94	2
Resiliencia mínima	0.71	9
Resiliencia en la hora pico	0.71	9

En cuanto al Índice de Resiliencia Modificada, cuyos resultados se muestran en la Tabla 8, se observa que la red presenta valores máximos, mínimos y de hora pico en los mismos momentos que el índice de Todini, reforzando la consistencia de los resultados. El excedente de energía promedio se sitúa en 2.47%, con un máximo de 2.78% en la hora 2 y un mínimo de 2.08% en la hora 9, esta última también correspondiente a la hora pico de demanda. Estos valores indican un comportamiento estable de las presiones, manteniendo un excedente de energía constante, e indicando que la resiliencia de la red, incluso en instantes de máxima demanda, es excelente.

Tabla 8.

Cálculo de la resiliencia de la red Red_Caso1 mediante el Índice de Resiliencia Modificado

Índice de Resiliencia Modificado		
Métrica de resiliencia	Valor (%)	Hora
Resiliencia media	2.47	-
Resiliencia máxima	2.78	2
Resiliencia mínima	2.08	9
Resiliencia en la hora pico	2.08	9

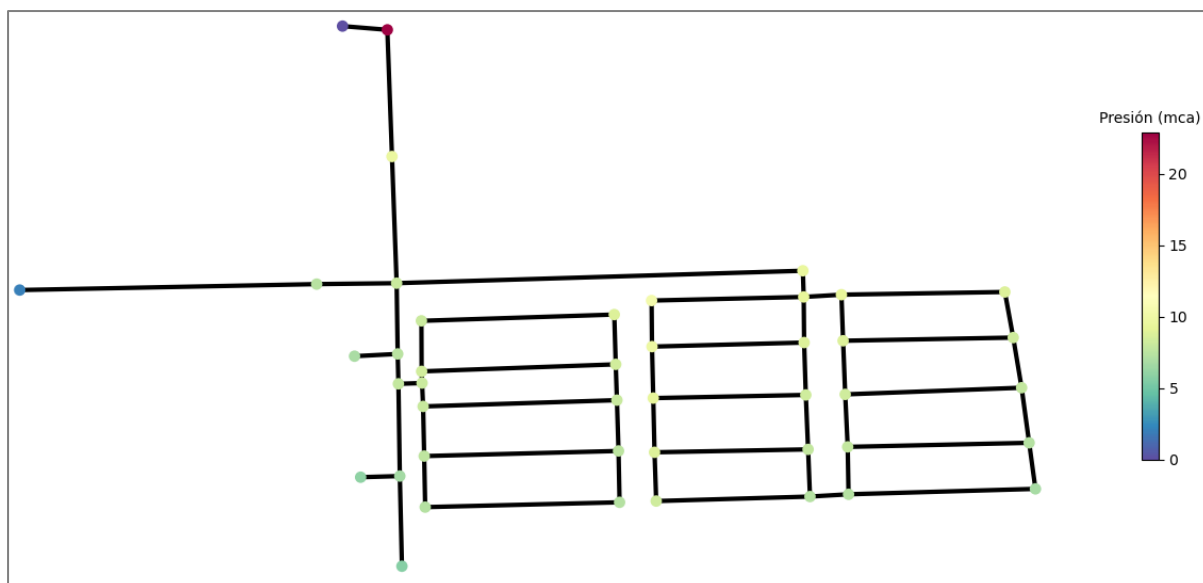
Simulación de fuga

En la Figura 46, se muestra el mapa de presiones en la red durante la hora 9, reflejando el comportamiento del sistema en un momento de alta demanda. Se observa una disminución generalizada en las presiones, con los valores más bajos concentrados en los extremos de la red y en ciertas ramificaciones, especialmente en la parte inferior y derecha del esquema. En contraste, los nodos más cercanos a la fuente de abastecimiento mantienen presiones relativamente más altas.

Sin embargo, todas las presiones registradas permanecen por encima del mínimo normativo de 5 mca, lo que garantiza la continuidad del servicio. La distribución de presiones sugiere que las tuberías principales logran mantener el suministro sin generar puntos críticos de déficit, aunque en ciertas zonas la presión podría acercarse al umbral inferior recomendado.

Figura 46.

Mapa de presiones en la red Red_Caso1 con presencia de fuga



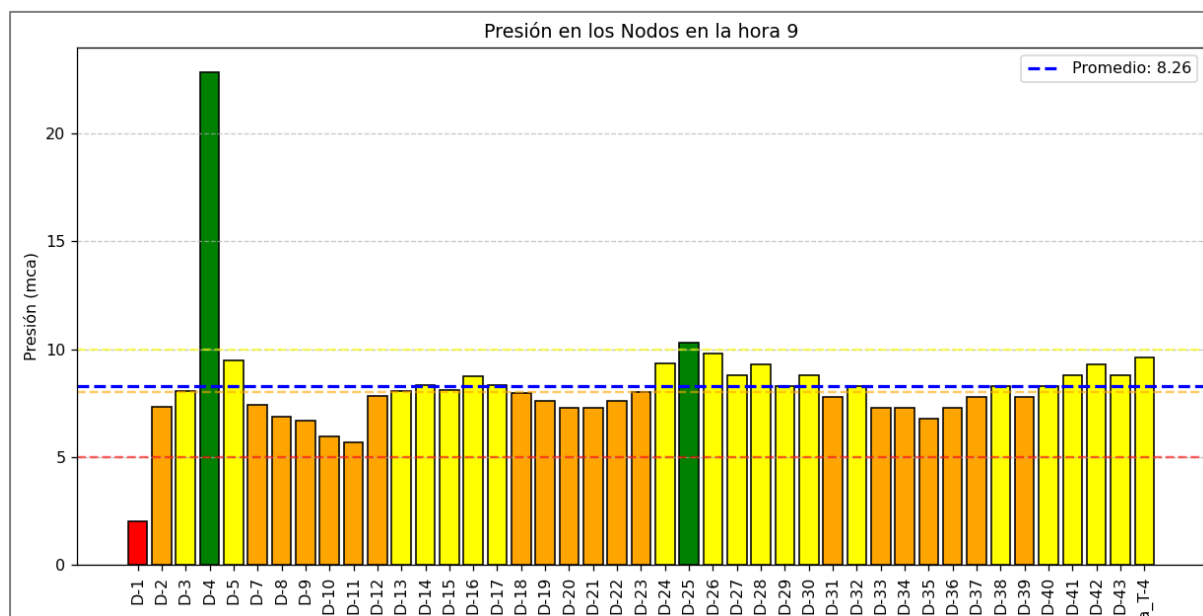
En la Figura 47, se presenta la distribución de presiones en la red durante la hora 9, con la fuga aún activa. Se observa que la mayoría de los nodos mantienen presiones cercanas al umbral de 10 mca, con un valor promedio de 8.26 mca. Esto indica que, a pesar del impacto de la fuga, el sistema sigue operando dentro de rangos aceptables para la mayoría de los usuarios.

Sin embargo, se identifican dos situaciones particulares: en primer lugar, el nodo ‘D-1’ presenta una presión por debajo del límite mínimo de 5 mca, lo que sugiere dificultades en el abastecimiento en esa zona. En segundo lugar, algunos nodos, como ‘D-4’ y ‘D-25’, muestran presiones significativamente más altas y dentro de un rango aceptable en comparación con el resto.

En el caso del nodo ‘D-4’, esta condición se debe a que la fuga se encuentra en la tubería ‘T-4’, que es la tubería que sale de este nodo. Como resultado, el flujo en ‘D-4’ se mantiene estable antes de que el agua se pierda por la fuga, lo que explica su presión relativamente elevada. Por otro lado, el nodo ‘D-25’ destaca como el segundo con mayor presión en la red, lo que lo hace más resiliente frente a la afectación causada por la fuga, asegurando un mejor desempeño en su zona en comparación con otros nodos más vulnerables.

Figura 47.

Distribución de presiones en los nodos de la red Red_Caso1 en la hora 9 con presencia de fuga



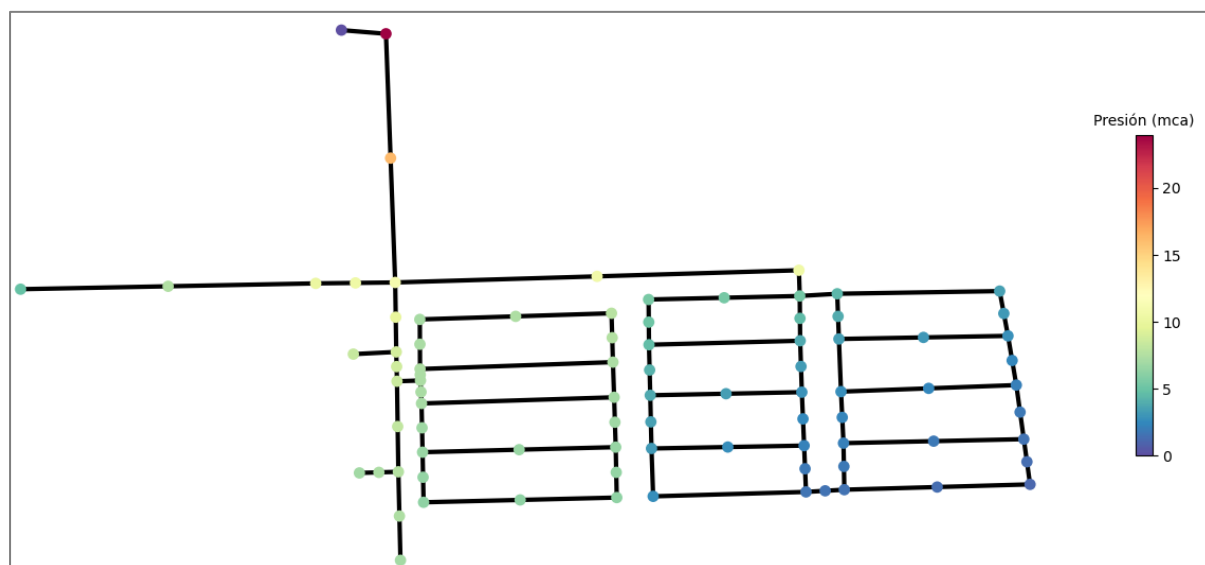
Simulación de terremoto

Las figuras 48 y 49 muestran los mapas de presión en la hora 24 sin aplicar reparaciones y al aplicar reparaciones, respectivamente.

En la Figura 48 se observa la distribución de presiones en la red en la hora 24 de la simulación del sismo, reflejando el impacto del evento sobre el sistema de distribución de agua. Se evidencia una reducción significativa en las presiones, especialmente en los nodos más alejados del punto de suministro, donde los valores caen por debajo de los 5 mca. Este comportamiento indica una afectación severa en el abastecimiento, comprometiendo la capacidad de la red para suministrar agua de manera adecuada.

Figura 48.

Mapa de presiones en la red Red_Caso1 en la hora 24 de la simulación del sismo sin aplicar reparaciones de fugas

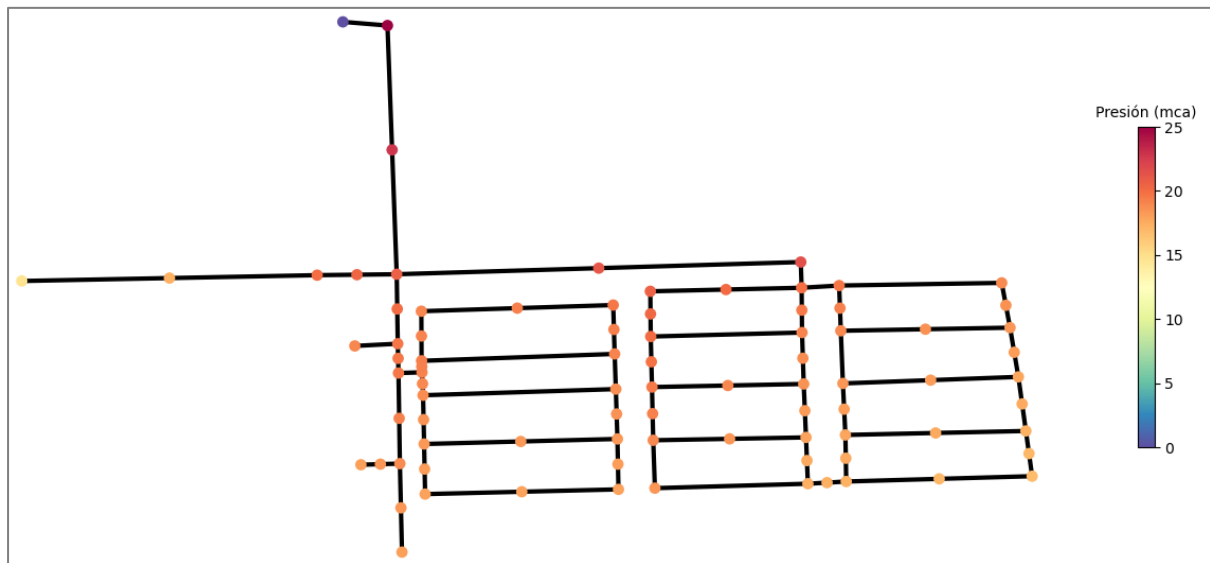


Por otro lado, la Figura 49 muestra el estado de la red después de la implementación de la reparación de fugas en el mismo instante de análisis. Para alcanzar estos resultados, se realizaron tres iteraciones en las que se ajustó la cantidad de fugas reparadas, permitiendo que las presiones en la mayoría de los nodos alcanzaran valores superiores al umbral mínimo de 10 mca. Se observa una mejora notable en el equilibrio de presiones, con un restablecimiento progresivo del servicio en los nodos más afectados.

A pesar de la relativa simplicidad de la red analizada, la cantidad de fugas generadas por el sismo fue considerable, lo que requirió estrategias de reparación intensivas dentro del tiempo disponible.

Figura 49.

Mapa de presiones en la red Red_Caso1 en la hora 24 de la simulación del sismo al aplicar reparación de fugas

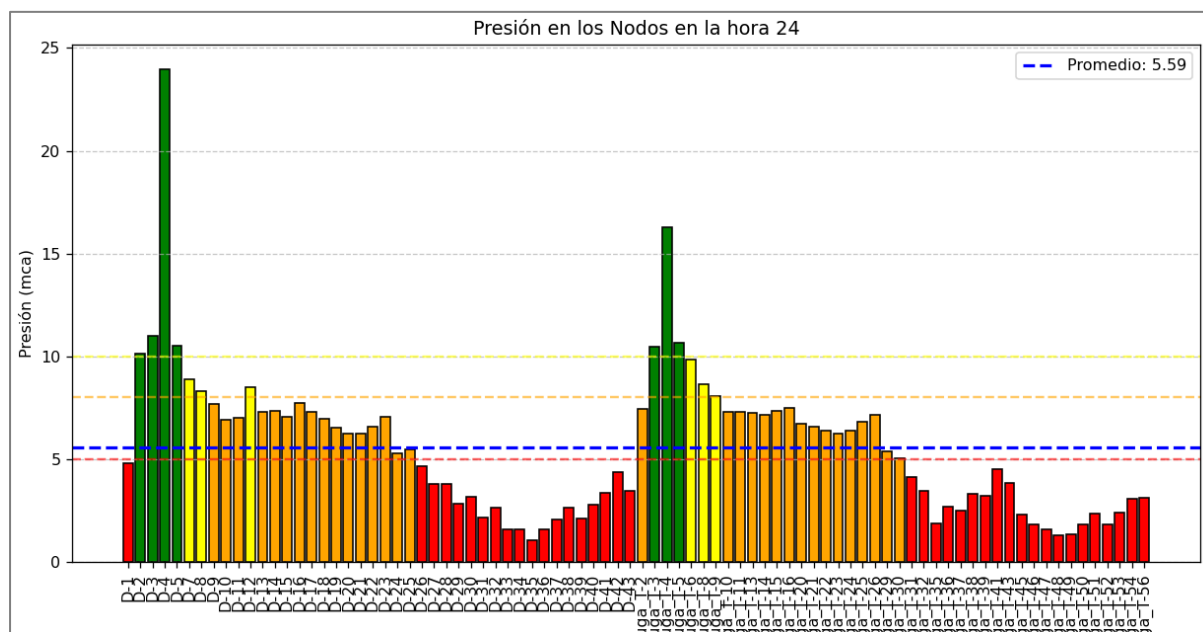


Las figuras 50 y 51 muestran la distribución de presiones en los nodos de la red en la hora 24, sin aplicar reparaciones y al aplicar reparaciones, respectivamente.

La Figura 50 muestra la distribución de presiones en la red después del sismo, sin aplicar reparaciones. Se observa una reducción significativa en las presiones debido a las fugas generadas por el evento, lo que deja algunos nodos con niveles críticos de presión, incluso por debajo de los 5 mca, lo que implica una interrupción en el servicio. Sin embargo, la resiliencia de la red permite que ciertas zonas mantengan un suministro parcial, asegurando el abastecimiento en algunos sectores. La presión promedio en la red se reduce a 5.59 mca, un valor que está por debajo del umbral necesario para garantizar un servicio eficiente.

Figura 50.

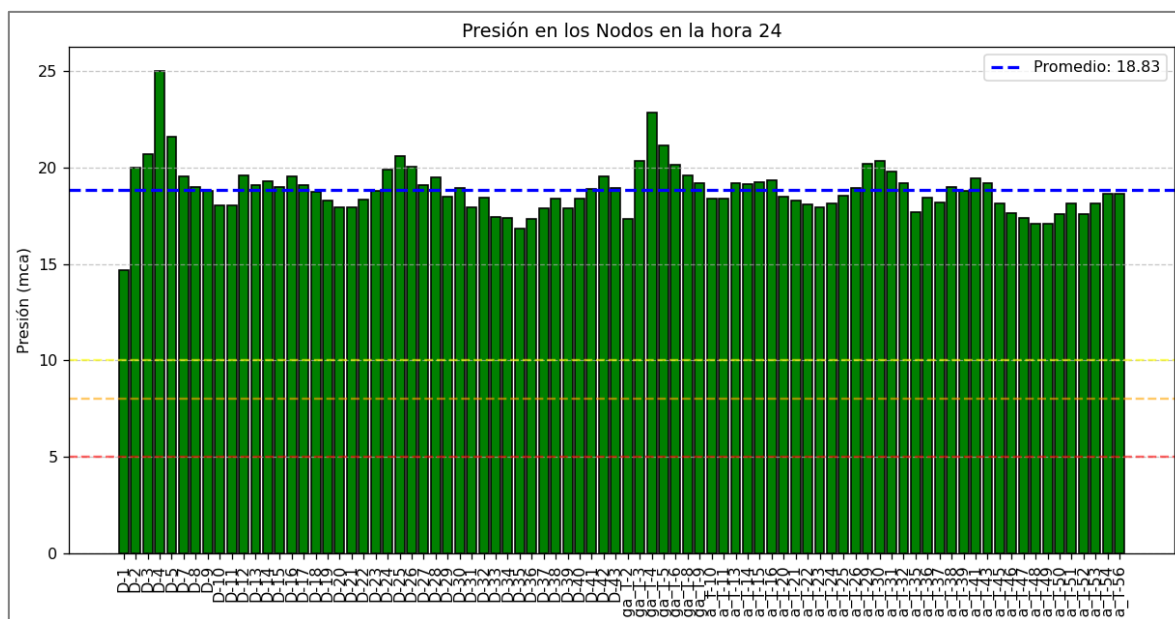
Distribución de presiones en los nodos de la red Red_Caso1 en la hora 24 de la simulación del sismo sin aplicar reparaciones de fugas



En la Figura 51, se presenta la distribución de presiones tras la aplicación de reparaciones en la red. Se observa una recuperación sustancial en los valores de presión, con todos los nodos alcanzando niveles superiores a los 10 mca. La presión promedio se eleva a 18.83 mca, lo que indica una restauración efectiva del servicio en toda la red. Nodos que previamente tenían presiones críticas ahora presentan valores dentro de rangos adecuados, asegurando una correcta prestación del servicio y mejorando la capacidad de distribución en comparación con la situación previa a la intervención.

Figura 51.

Distribución de presiones en los nodos de la red Red_Caso1 en la hora 24 de la simulación del sismo al aplicar reparación de fugas



4.3.3. Evaluación caso red.Qmd

Los diámetros finales adoptados para las tuberías de la red red.Qmd se presentan en la Tabla 9. Las tuberías que no fueron modificadas conservaron un diámetro de 80.42 mm (3").

Se observa que los tramos más críticos de la red fueron dimensionados con diámetros mayores, lo que garantiza un adecuado transporte del caudal sin afectar las presiones en los distintos puntos de demanda. Las tuberías principales presentan diámetros de hasta 12" (293.07 mm), mientras que las secundarias y terciarias fueron diseñadas con diámetros menores, en función de la reducción progresiva de los caudales a medida que el agua se distribuye a las zonas de consumo.

Tabla 9.*Diámetros adoptados para las tuberías de la red red.Qmd*

Tubería	Diámetro (")	Diámetro (mm)
p1	6	152.22
p2	6	152.22
p5	6	152.22
p10	6	152.22
p11	6	152.22
p19	6	152.22
p21	6	152.22
p28	6	152.22
p31	6	152.22
p32	6	152.22
p39	4	103.42
p45	6	152.22
p47	6	152.22
p50	6	152.22
p51	6	152.22
p63	6	152.22
p64	6	152.22
p65	6	152.22
p73	6	152.22
p80	6	152.22
p118	6	152.22
P149	12	293.07
P150	12	293.07
P147	4	103.42
P148	6	152.22
P145	6	152.22
P151	12	293.07
P152	6	152.22
P153	6	152.22
P154	6	152.22
P155	4	103.42
P156	8	198.21
P157	4	103.42
P158	6	152.22

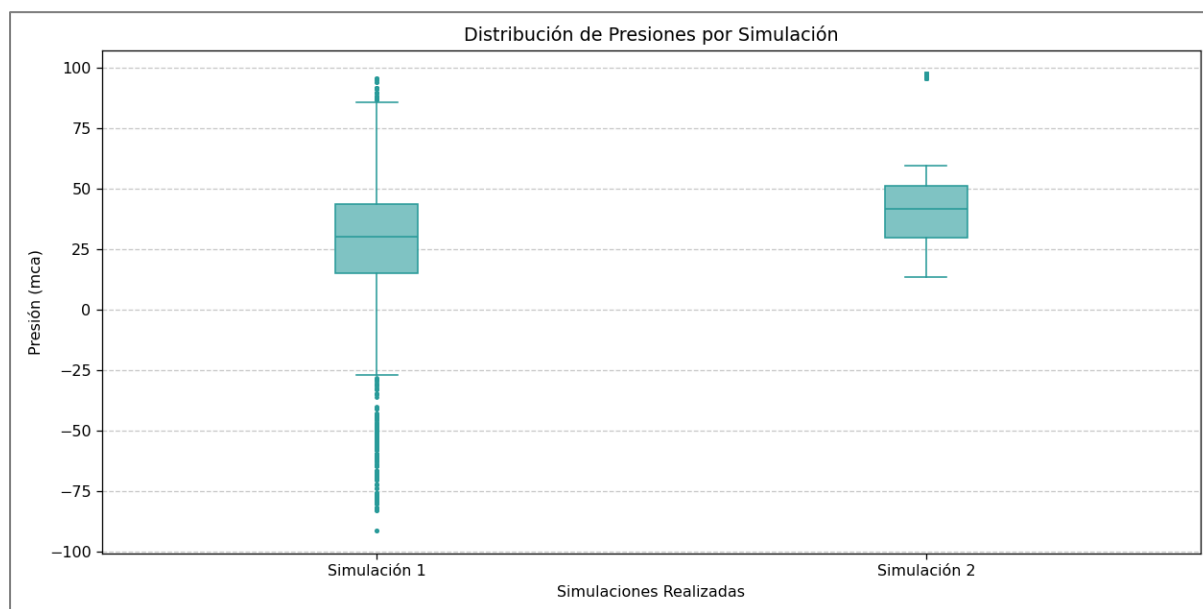
Similar a la evaluación del caso Red_Caso1, en la Figura 52 se presenta la comparación de las presiones entre la red sin diseñar y la red diseñada. En la Simulación 1, que representa la red sin diseñar, se observan valores de presión que varían desde aproximadamente 15 mca hasta 85 mca, con una media cercana a 30 mca, y valores atípicos que se acercan a -100 y a

100, los valores atípicos indican un número significativo de nodos que presentan presiones negativas, lo que indica problemas críticos en la red, imposibilitando su implementación.

Tras el diseño, en la Simulación 2, las presiones se estabilizan en un rango positivo, con valores entre aproximadamente 15 mca y 60 mca. Esto elimina las presiones negativas, reduce significativamente los valores atípicos, los cuales se acercan a 100 mca y da como resultado una presión media de aproximadamente 40 mca. Estos valores se deben a la topografía de la red y a la altura de la fuente, lo que generó algunos nodos con presiones elevadas. Aunque estos no cumplen con la normativa, no era posible modificarlos debido a las condiciones topográficas. Por esta razón, se implementó una válvula, permitiendo que, aunque algunos nodos presenten presiones muy altas, el resto de la red mantenga valores dentro del rango normativo.

Figura 52.

Rango de presiones registradas en la simulación después de diseñar la red red.Qmd

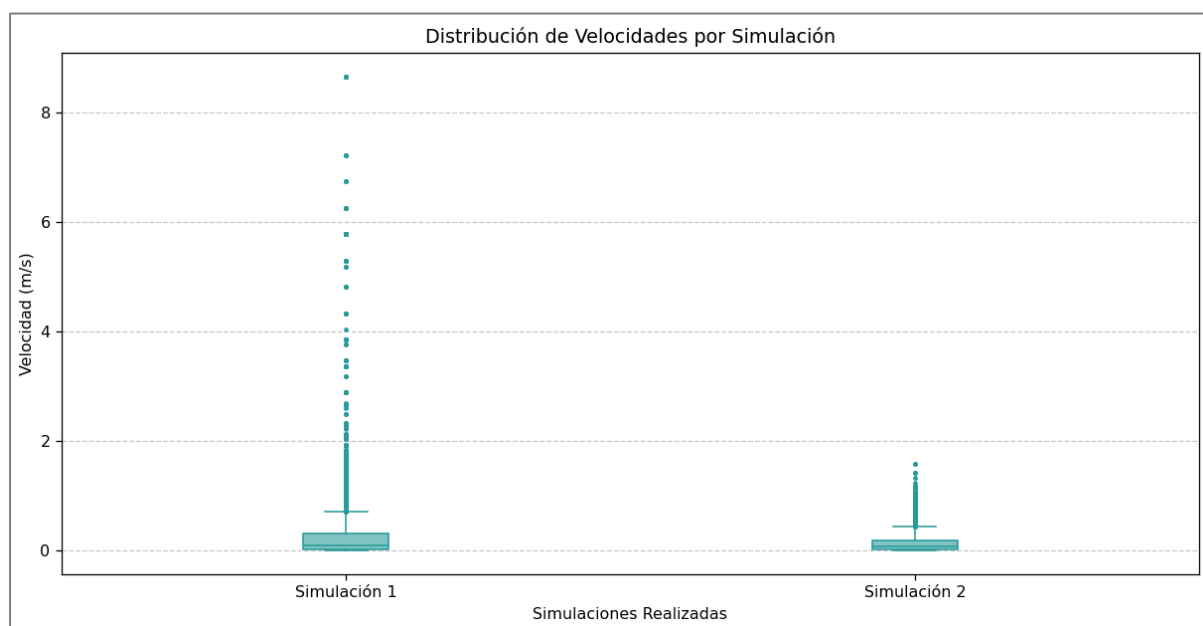


En la Figura 53 se presenta la distribución de velocidades en ambos escenarios evaluados. En la Simulación 1, las velocidades presentan una alta variabilidad, con valores de atípicos que superan los 8 m/s.

En la Simulación 2, tras la optimización de los diámetros, las velocidades se reducen y se distribuyen de manera más estable, con la mayoría de los valores dentro de un rango aceptable y sin superar el límite normativo. Esta mejora indica un flujo más controlado y eficiente dentro de la red.

Figura 53.

Rango de velocidades registradas en la simulación después de diseñar la red red.Qmd

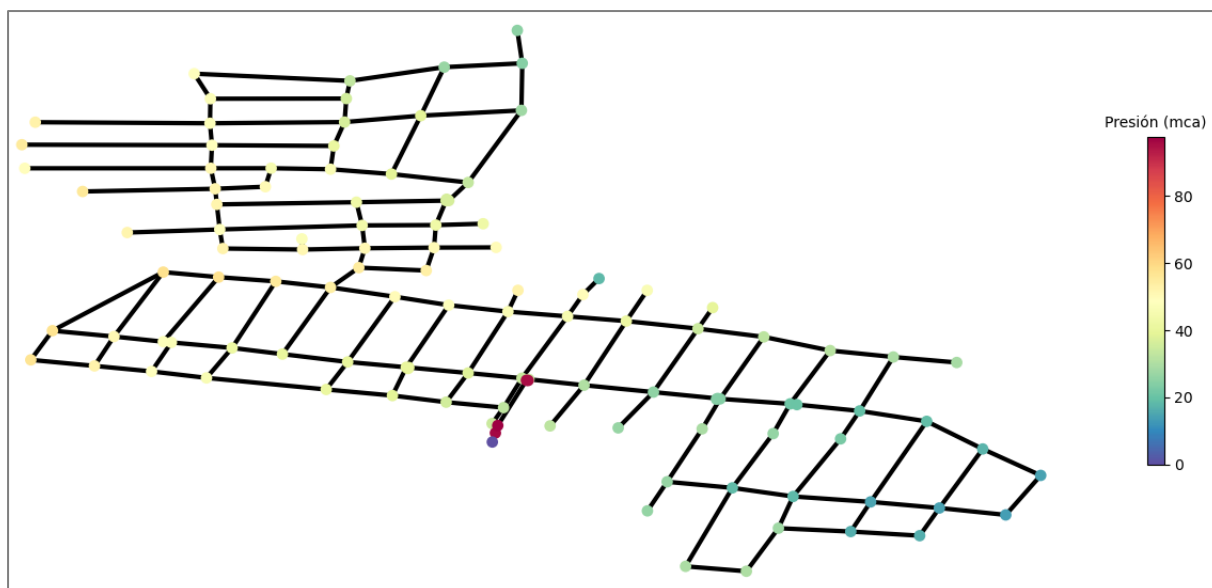


En la Figura 54, se observa la distribución de presiones en los nodos de la red durante la hora de máxima demanda (hora 5). Se identifican zonas con presiones elevadas en la parte central de la red, donde se encuentra ubicado el embalse. Desde este punto, el caudal comienza a distribuirse, generando valores altos de presión en los nodos cercanos a la salida del embalse debido a las condiciones topográficas.

También se puede apreciar, que las presiones más bajas se localizan en el extremo derecho de la red, donde algunos nodos presentan valores por debajo de 20 mca, aunque sin descender por debajo de los 10 mca, cumpliendo así con los requisitos normativos. En contraste, en el extremo izquierdo de la red, las presiones se mantienen en un rango más estable, oscilando entre 60 mca y 40 mca, lo que indica un comportamiento hidráulico equilibrado en esa sección.

Figura 54.

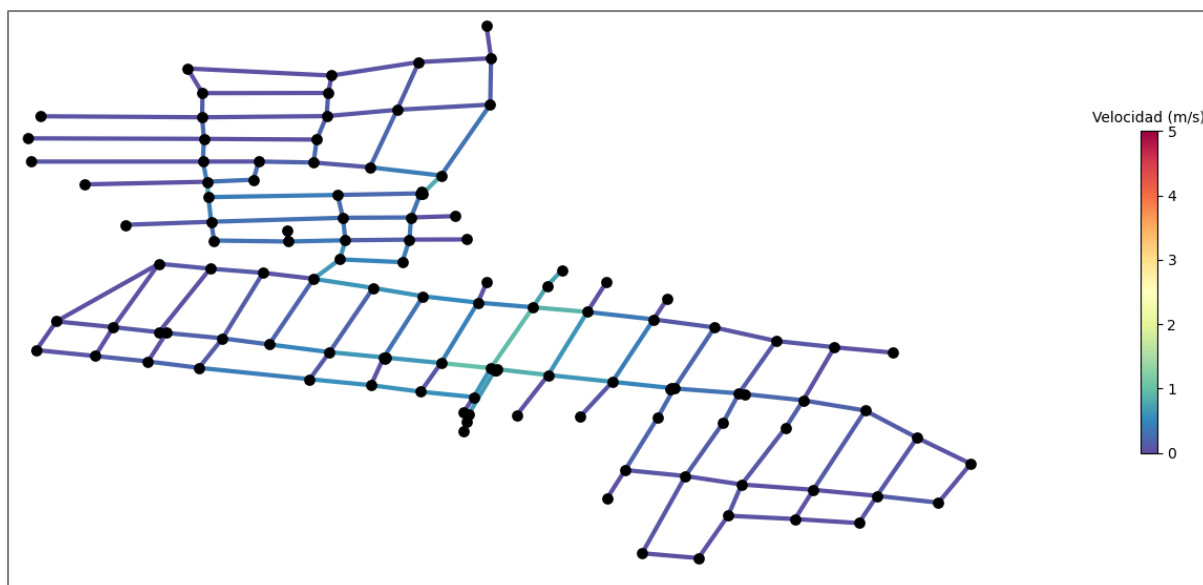
Mapa de presiones en la red red.Qmd diseñada



La Figura 55 muestra la distribución de velocidades en las tuberías. Se observa que, en la mayoría de los casos, las velocidades no superan los 0.5 m/s, con algunas excepciones. Las mayores velocidades se presentan en la zona central de la red y en ciertas tuberías de la zona superior izquierda. Estas velocidades más elevadas ocurren principalmente en las tuberías principales, que fueron modificadas para adoptar un mayor diámetro, con valores en un rango de 0.4 a 0.5 m/s. En contraste, en los ramales secundarios, las velocidades disminuyen, lo que indica una distribución más estable del flujo.

Figura 55.

Mapa de velocidades en la red red.Qmd rediseñada



A continuación, en las Figuras 56 y 57 se presentan las presiones y demandas en los nodos de la red, mientras que en las Figuras 58 y 59 se muestran las velocidades y caudales en las tuberías. Todos estos parámetros corresponden a la hora 5, que representa el momento de máximo consumo.

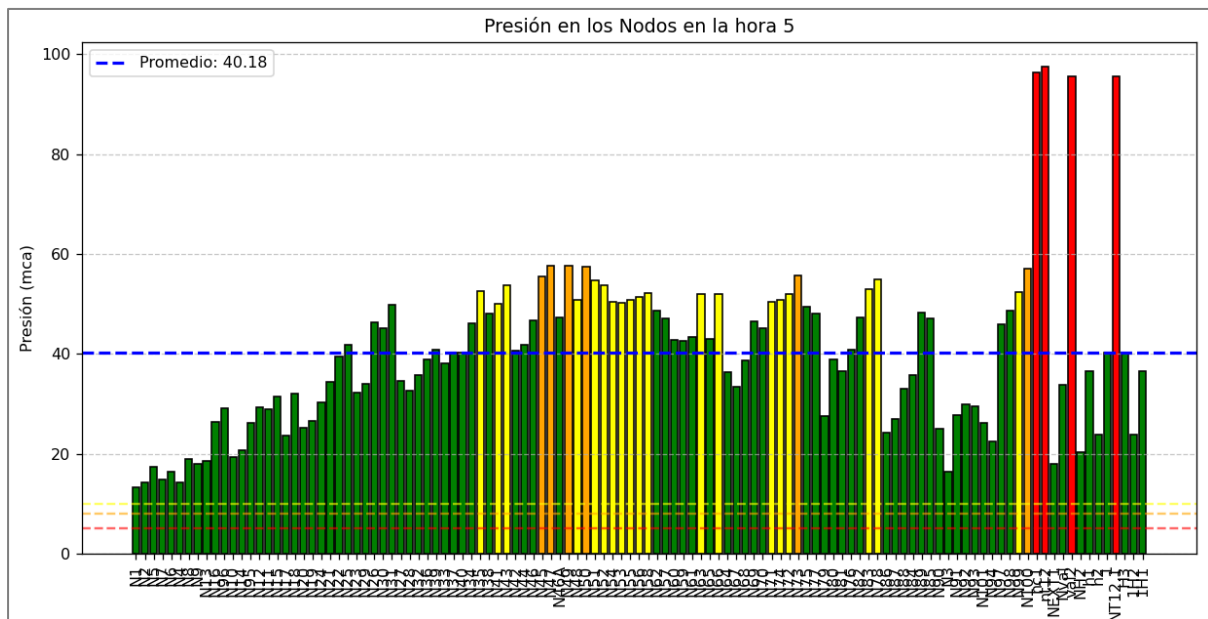
En la Figura 56 se observa una gran variabilidad en las presiones de los nodos. En general, los valores se encuentran entre 10 mca y 60 mca, con una presión promedio de 40.18 mca. Sin contar a los nodos con las presiones fuera de los límites, el nodo con mayor presión es el nodo 'N47' con 57.70 mca, mientras que el nodo con la presión más baja es el nodo 'N1', con 13.37 mca.

Los nodos con presiones superiores a 50 mca se representan en color amarillo, lo que indica que aún están dentro del rango aceptable, aunque acercándose al límite inferior de 50 mca. Los nodos en color naranja superan los 55 mca, advirtiendo que están próximos a exceder el máximo permitido por la normativa. Finalmente, los nodos en color rojo han sobrepasado el límite máximo de 60 mca, correspondiendo a los nodos de descarga del embalse, donde las presiones son significativamente más altas en comparación con el resto de la red.

A pesar de estas advertencias, todos los nodos, excepto los de descarga del embalse, cumplen con la normativa, ya que la variabilidad en las presiones es aceptable según las áreas de aporte de cada nodo.

Figura 56.

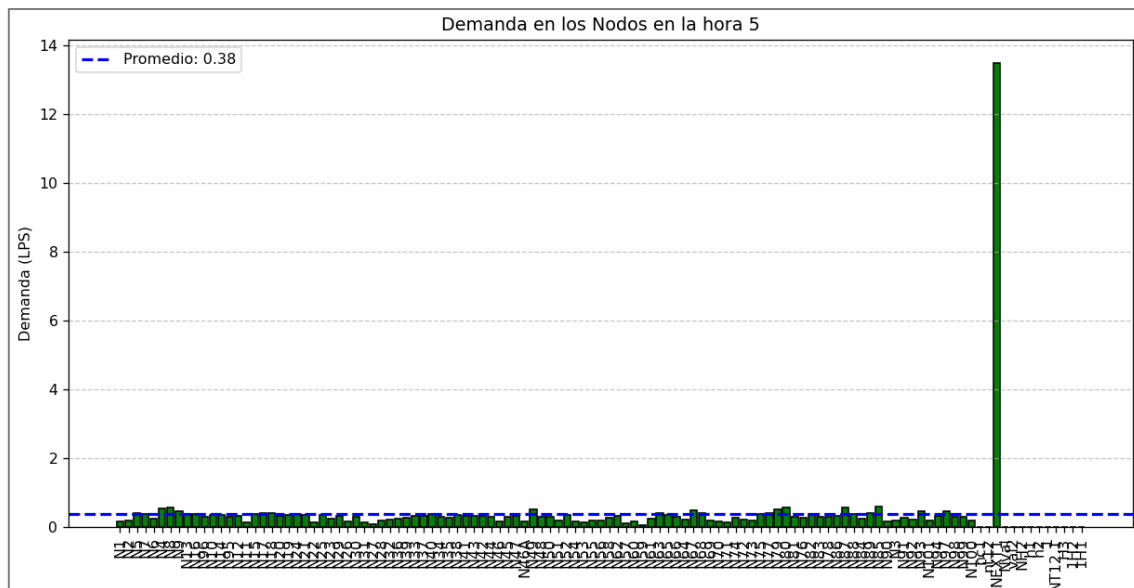
Distribución de presiones en los nodos en la hora 5 para la red red.Qmd



En la Figura 57, la mayoría de los nodos presentan demandas cercanas al promedio de 0.38 LPS, indicado por la línea punteada azul. El nodo 'NEXT1' presenta el valor más alto de demanda, alcanzando los 13.50 LPS, lo que sugiere que abastece una zona con alta necesidad de consumo e indica un alza en la demanda dentro del sistema para la hora 5, condicionando que este sea el instante de mayor demanda. El patrón general indica una distribución relativamente uniforme de la demanda en la mayoría de los nodos, con excepción del pico identificado.

Figura 57.

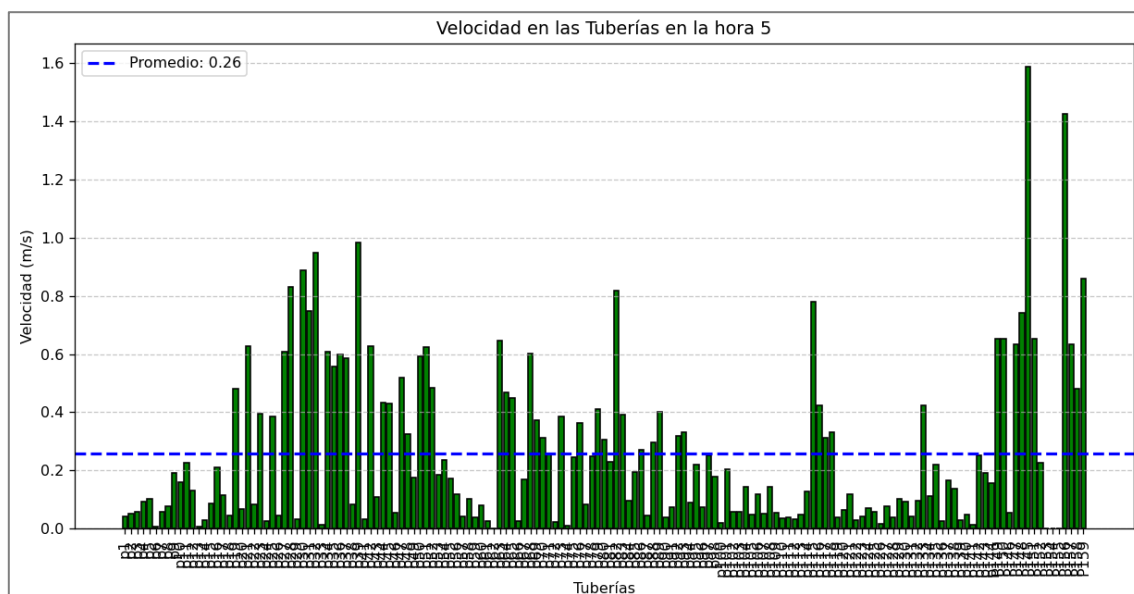
Distribución de demandas en los nodos en la hora 5 para la red red.Qmd



La Figura 58 muestra la velocidad en las tuberías, con un valor promedio de 0.26 m/s. Aunque existe una gran variabilidad en las velocidades, esta no resulta determinante, ya que la mayoría de las tuberías operan con valores inferiores a 1 m/s. La tubería 'P145' registra la velocidad más alta, alcanzando 1.59 m/s. Este patrón sugiere una distribución heterogénea de las velocidades en la red, posiblemente influenciada por la geometría del sistema.

Figura 58.

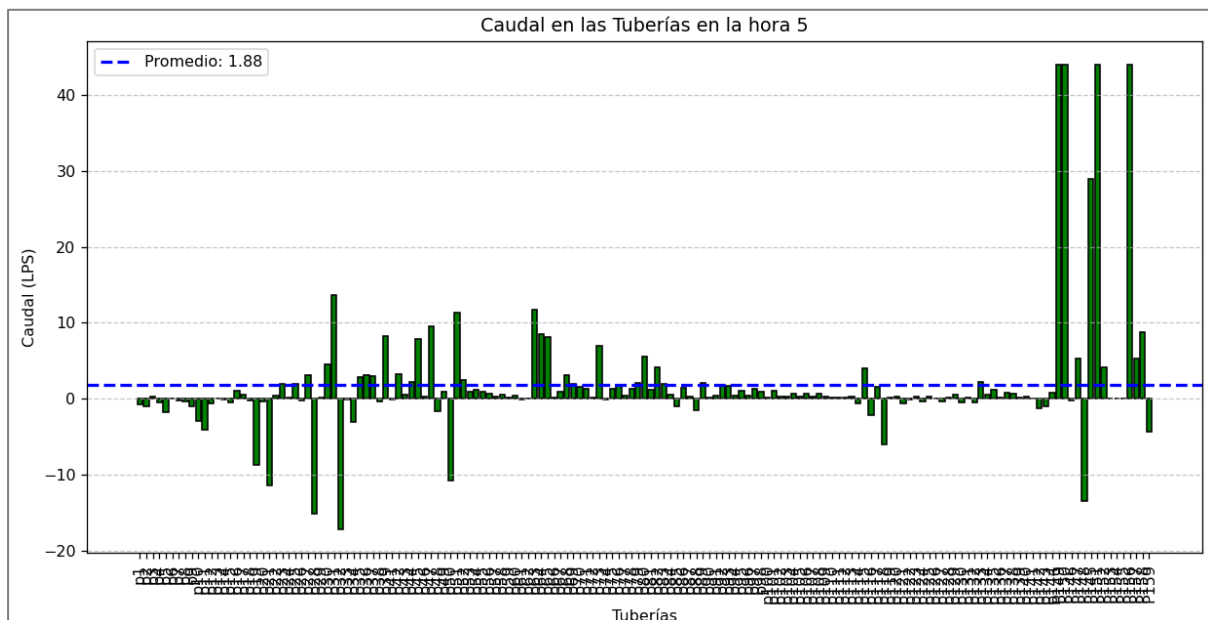
Distribución de velocidades en las tuberías en la hora 5 para la red red.Qmd



La Figura 59 muestra los caudales en las tuberías, con un valor promedio de 1.88 LPS. Se observa una alta variabilidad, con algunas tuberías que superan ampliamente este valor, mientras que otras registran caudales negativos, lo que indica un flujo en sentido contrario y sugiere posibles fallos en el diseño geométrico de la red. Destacan las tuberías ‘P149’, ‘P150’, ‘P151’ y ‘P156’, que transportan un caudal de 44.05 LPS, actuando como las principales vías de descarga del embalse.

Figura 59.

Distribución de caudales en las tuberías en la hora 5 para la red red.Qmd



Métricas de resiliencia

Los valores de las métricas de resiliencia calculadas utilizando el Índice de Todini y el Índice de Resiliencia Modificada se presentan en las Tabla 10 y 11. En la tabla 10 se observan valores aparentemente bajos, lo que podría llevar a concluir que la red no es resiliente. Sin embargo, los valores en la tabla 11 muestran un excedente de energía bastante grande en distintas horas, lo que sugiere que la red sí cuenta con una reserva de potencia adecuada para enfrentar demandas o fallas inesperadas.

Este comportamiento se explica por el fenómeno descrito por Jayaram y Srinivasan (2008), quienes señalan que, en redes con múltiples fuentes o con condiciones que eleven

significativamente la potencia de entrada, el índice de Todini puede subestimar la resiliencia real. Al incrementarse la potencia total de entrada (por ejemplo, debido a presiones elevadas en la fuente o a la configuración hidráulica), la proporción de potencia excedente que evalúa el índice de Todini se reduce, dando la impresión de una resiliencia menor. Sin embargo, el análisis de las presiones en la red confirma la existencia de este fenómeno. Los nodos ubicados antes de la válvula reguladora presentan presiones significativamente más altas que aquellos ubicados después de la misma, lo que origina una disparidad notable en los niveles de energía disponibles. Aun así, los nodos con menor presión conservan un excedente de energía suficiente para mantener el servicio, lo que refuerza la conclusión de que, en conjunto, la red cuenta con una reserva de potencia adecuada. El Índice de Resiliencia Modificada, al centrarse en la relación entre la potencia excedente y la mínima requerida directamente en los nodos de demanda, refleja de manera más fiel la capacidad de la red para hacer frente a eventos adversos.

Tabla 10.

Cálculo de la resiliencia de la red red.Qmd mediante el Índice de Todini

Índice de Todini		
Métrica de resiliencia	Valor (-)	Hora
Resiliencia media	0.27	-
Resiliencia máxima	0.28	24
Resiliencia mínima	0.25	5
Resiliencia en la hora pico	0.25	5

Tabla 11.

Cálculo de la resiliencia de la red red.Qmd mediante el Índice de Resiliencia Modificado

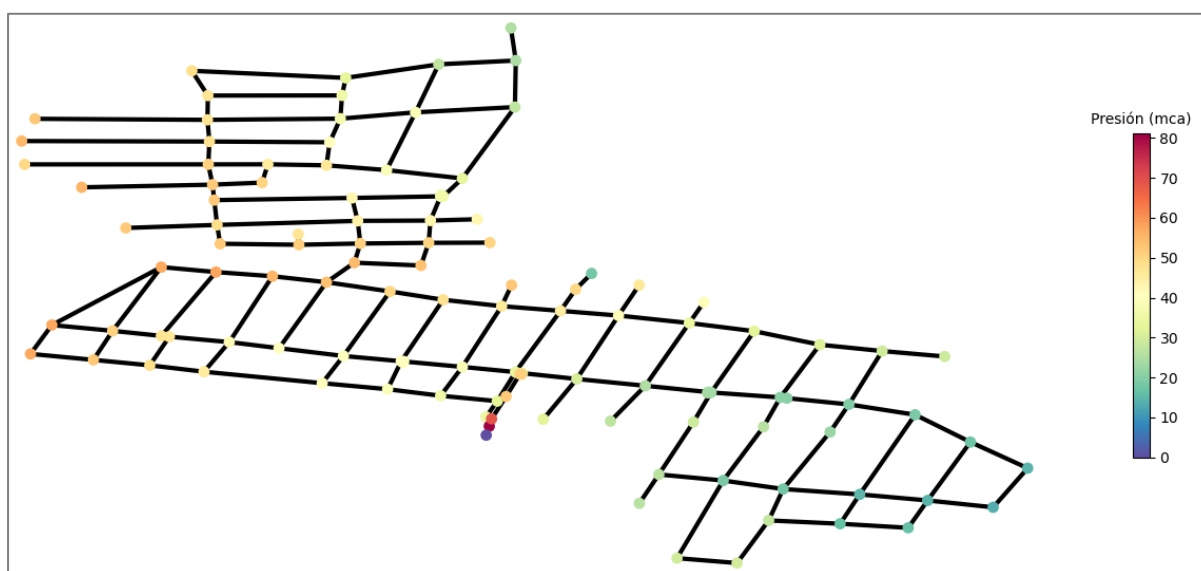
Índice de Resiliencia Modificado		
Métrica de resiliencia	Valor (%)	Hora
Resiliencia media	7.84	-
Resiliencia máxima	8.07	2
Resiliencia mínima	7.39	6
Resiliencia en la hora pico	7.39	5

Simulación de fuga

La Figura 60 muestra el mapa de presiones de la red en la hora 5, correspondiente al momento de máxima demanda. En esta se observa que las presiones en los nodos no presentan variaciones significativas en comparación con el escenario sin fugas. Este comportamiento indica que la red posee una alta capacidad resiliente, permitiéndole mantener niveles de presión estables a pesar de la disrupción causada por la fuga.

Figura 60.

Mapa de presiones en la red red.Qmd con presencia de fuga



La Figura 61 muestra la distribución de presiones en la red durante la hora 5, mientras la fuga sigue activa. Los resultados indican que, en general, las presiones en los nodos se mantienen estables a lo largo de la red, sin cambios significativos. Esto sugiere que la red es capaz de distribuir las demandas de manera eficiente, incluso en presencia de la disrupción.

No obstante, se observa una disminución en la presión de cuatro nodos cercanos al embalse, afectada por la fuga en la tubería 'P151', la cual conecta los nodos 'nt12' y 'NT12.1'.

En particular, las presiones disminuyeron de la siguiente manera:

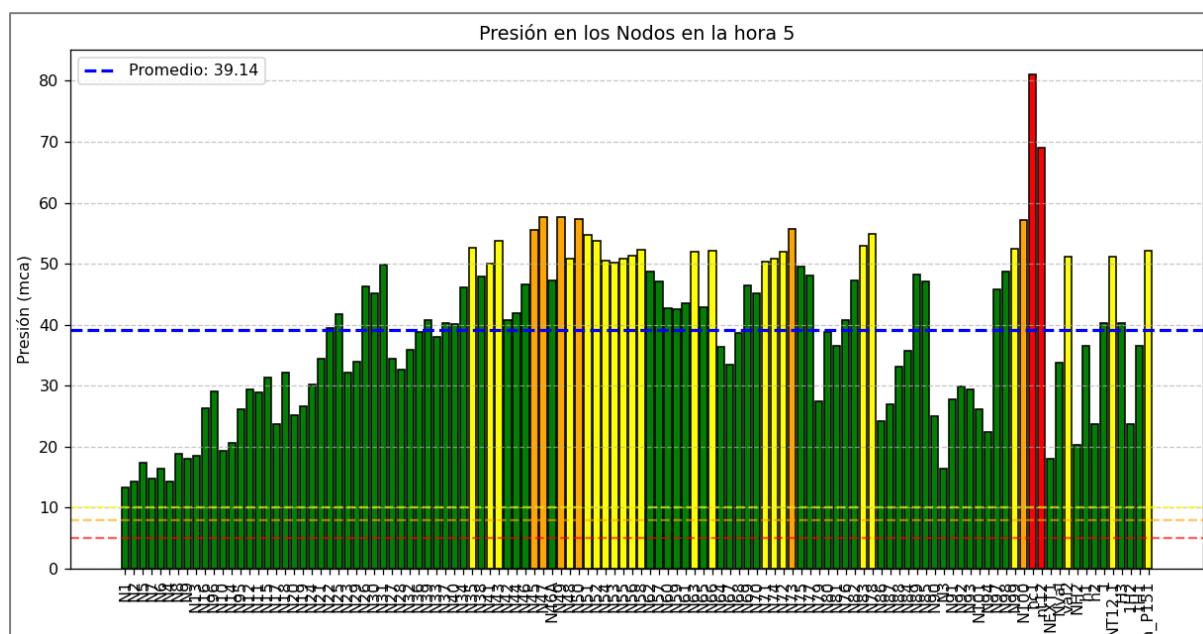
- Nodo 'nc1': de 96.35 mca a 81.08 mca.
- Nodo 'nt12': de 97.55 mca a 68.94 mca.

- Nodo 'NT12.1': de 95.63 mca a 51.15 mca.
- Nodo 'val2': de 95.58 mca a 51.10 mca.

Estos valores evidencian que, aunque la red mantiene su funcionamiento general, la fuga genera un impacto localizado en estos nodos.

Figura 61.

Distribución de presiones en los nodos de la red red.Qmd en la hora 5 con presencia de fuga



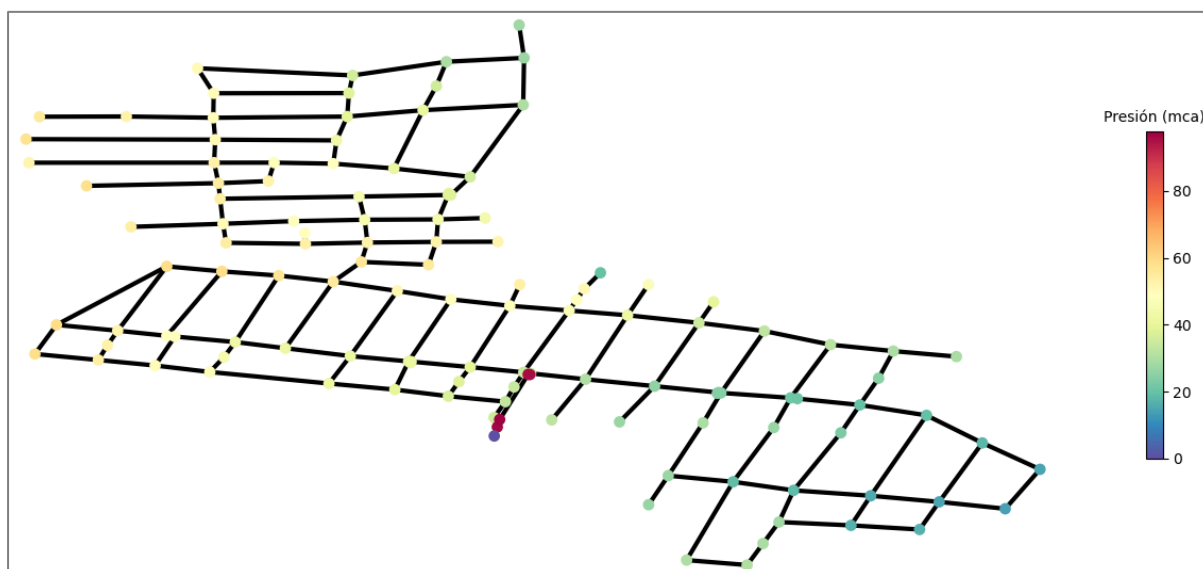
Simulación de terremoto

Al analizar los resultados que se muestran en las figuras 62 y 63 de los mapas de presiones antes y después de aplicar reparaciones, se observa que no hubo cambios significativos entre ambas simulaciones. A pesar de la reparación de las fugas, la red mantuvo sus condiciones operativas prácticamente intactas, lo que indica que estas pérdidas no afectaban de manera crítica su desempeño.

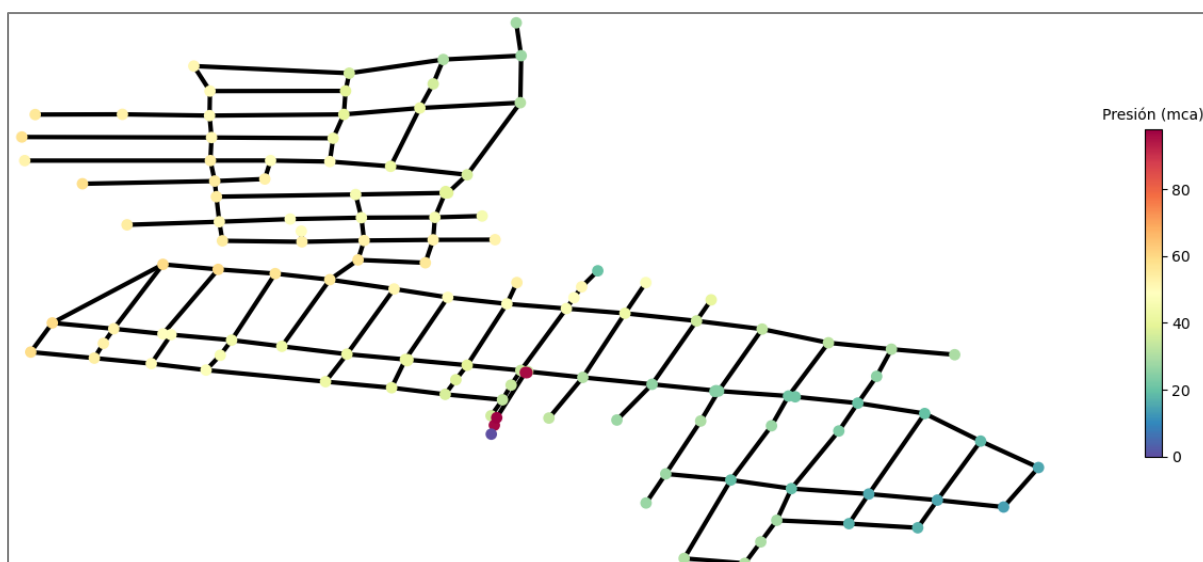
La red continuó satisfaciendo la demanda requerida y asegurando un servicio óptimo, lo que sugiere que posee un nivel de resiliencia adecuado para absorber el impacto del sismo, bajo las condiciones de simulación utilizadas, sin comprometer el suministro.

Figura 62.

Mapa de presiones en la red red.Qmd en la hora 24 de la simulación del sismo sin aplicar reparaciones de fugas

**Figura 63.**

Mapa de presiones en la red red.Qmd en la hora 24 de la simulación del sismo al aplicar reparación de fugas



Las Figuras 64 y 65 muestran la distribución de presiones en los nodos de la red después del sismo, antes y después de aplicar las reparaciones. Los resultados indican que no hubo variaciones significativas entre ambas simulaciones. Sin embargo, se observa que la presión

promedio en la primera simulación fue de 41.43 mca, mientras que en la segunda aumentó ligeramente a 41.95 mca.

Esto sugiere que las presiones no solo se mantuvieron dentro del umbral mínimo requerido, sino que también permanecieron estables en el tiempo y no se vieron afectadas de manera considerable por el sismo.

Figura 64.

Distribución de presiones en los nodos de la red red.Qmd en la hora 24 de la simulación del sismo sin aplicar reparaciones de fugas

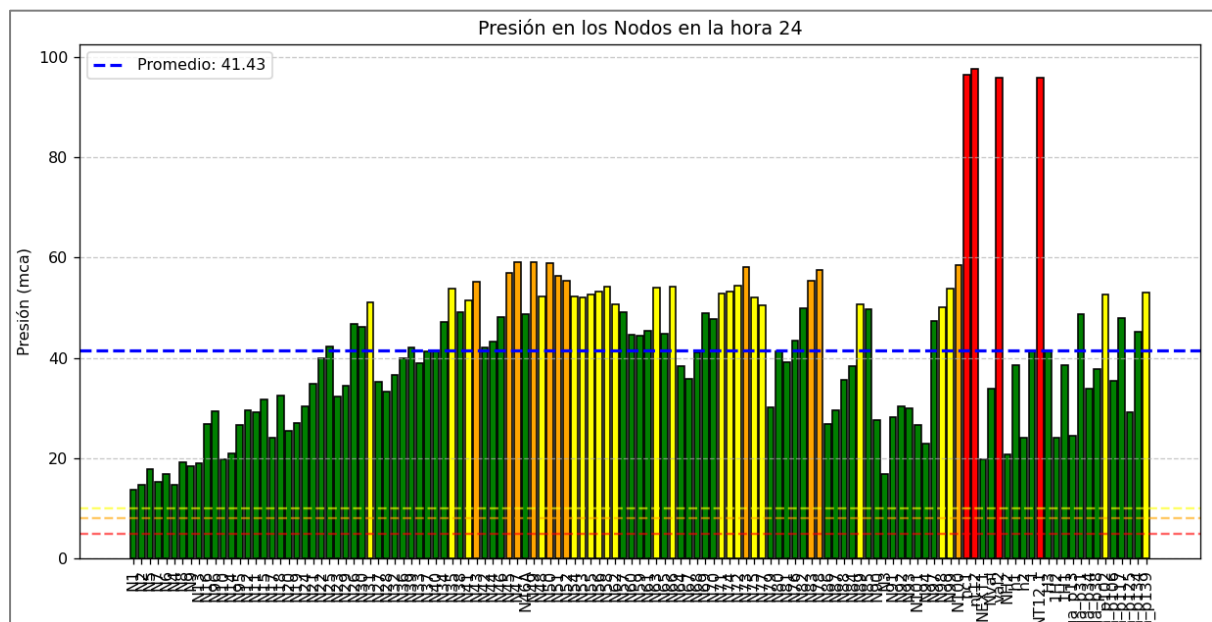
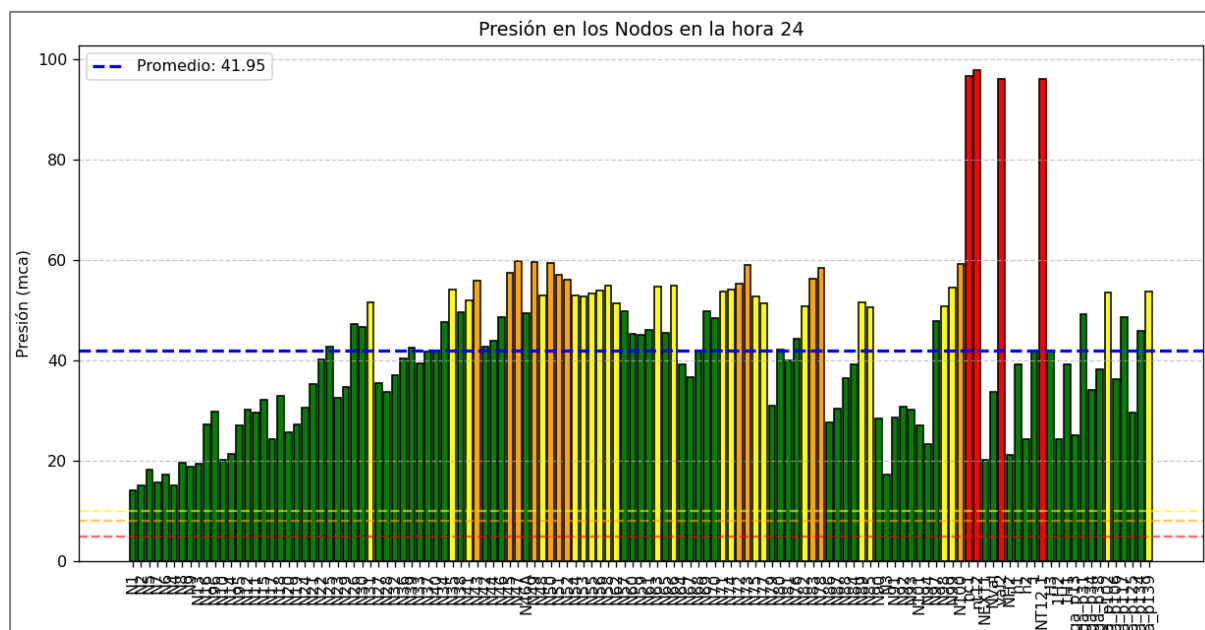


Figura 65.

Distribución de presiones en los nodos de la red red.Qmd en la hora 24 de la simulación del sismo al aplicar reparación de fugas



4.4.Evaluación de casos en Epanet

Después de exportar las redes diseñadas, estas fueron cargadas en el software EPANET, donde se realizaron simulaciones hidráulicas para analizar su desempeño bajo condiciones normales de operación y se extrajeron los resultados reportados.

Para evaluar la precisión de la herramienta desarrollada en este trabajo, se obtuvieron los mapas de presión y velocidad para cada caso y se realizaron gráficos de barras en los que los datos ingresados, eran los obtenidos de EPANET, con ello se contrastó de manera más fiable la similitud entre los resultados que arroja cada herramienta.

4.4.1. Evaluación caso Net1

Las Figuras 66 y 67 muestran los mapas de presión y velocidad de la red en la hora 3, momento de máximo consumo, hora 3. Los resultados obtenidos con EPANET presentan una distribución similar a los obtenidos con la herramienta desarrollada por los autores, reflejando la misma estructura hidráulica en cuanto a las variaciones espaciales de presión y velocidad.

Además, se observa que los valores obtenidos para cada elemento en este instante de tiempo coinciden con precisión entre ambas herramientas, lo que confirma la consistencia de los cálculos y la confiabilidad del modelo desarrollado.

Este nivel de concordancia sugiere que, para el caso Net1, la metodología implementada en la herramienta desarrollada permite obtener resultados equivalentes a los de EPANET, validando su aplicabilidad en la modelación de redes de distribución de agua.

Figura 66.

Mapa de presiones en la red Net1 rediseñada al evaluarla en Epanet

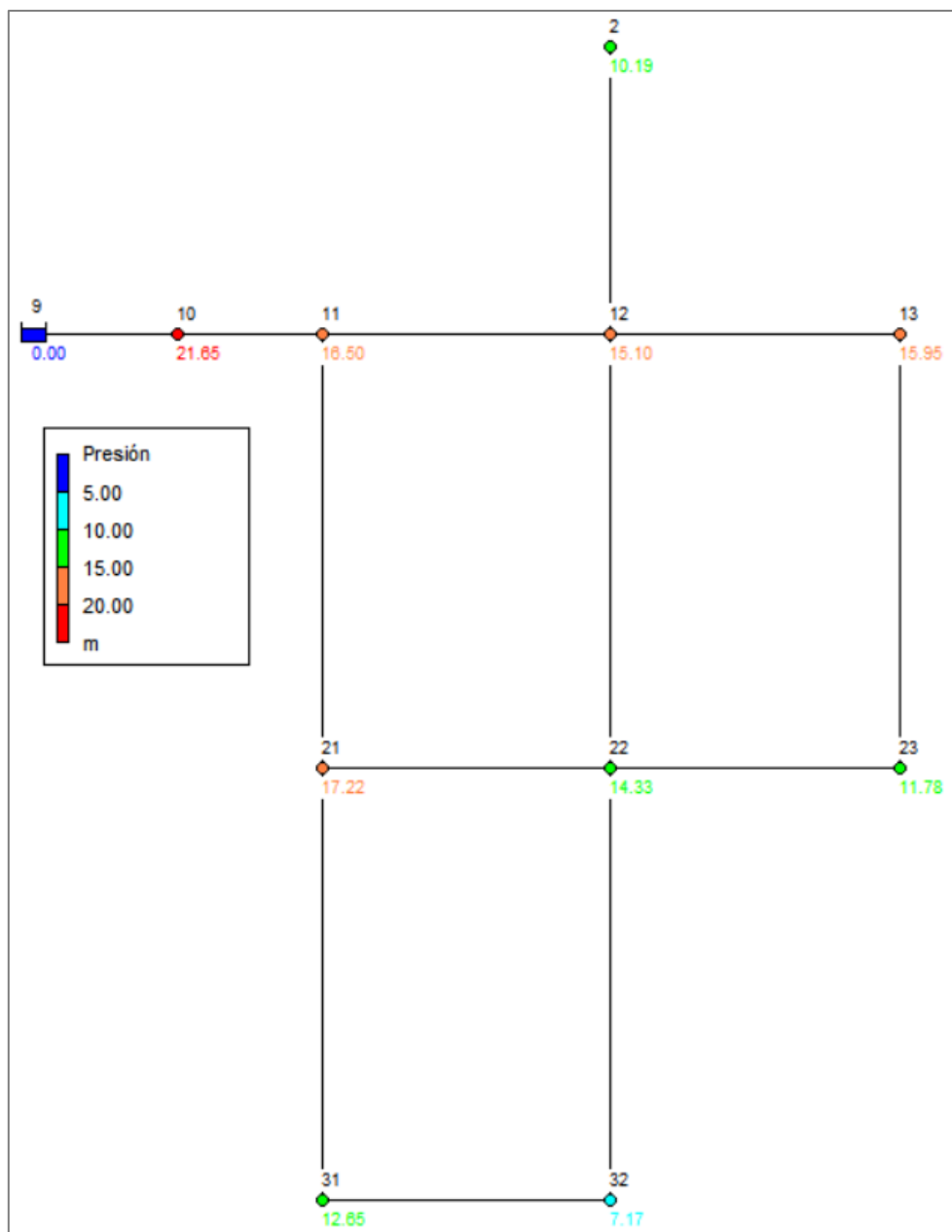
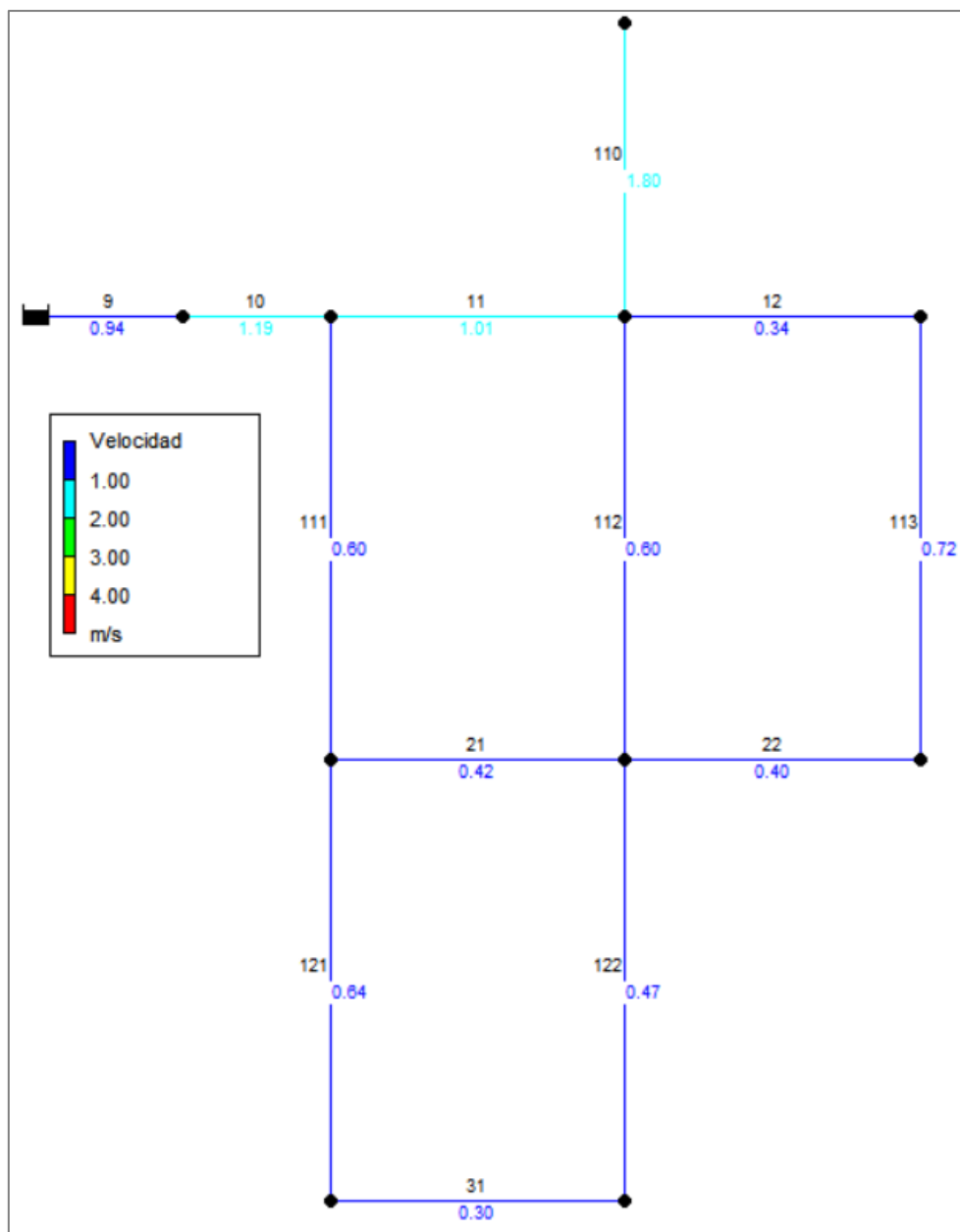


Figura 67.

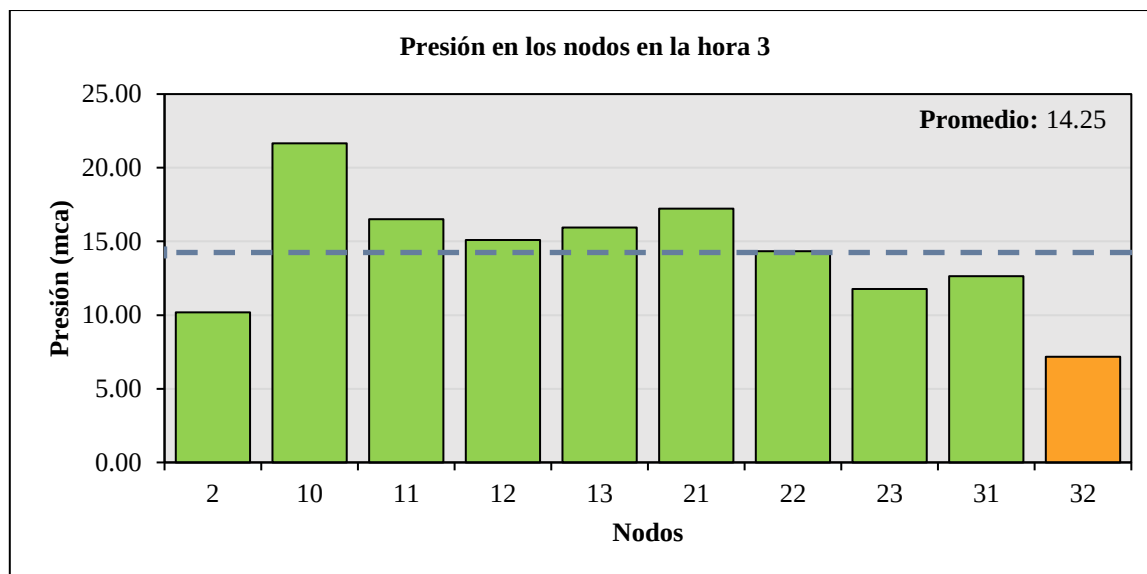
Mapa de velocidades en la red Net1 rediseñada al evaluarla en Epanet



La figura 68 presenta la distribución de presiones en los nodos de la red en la hora de máximo consumo, obtenida mediante EPANET. Al compararla con la gráfica de barras generada por la herramienta desarrollada, se observa que ambas presentan una tendencia similar, confirmando que la distribución de presiones en la red se representa de manera equivalente en ambos entornos. En particular, el nodo con la presión más alta, '10', alcanza un valor de 21.65 mca, el mismo registrado en la herramienta creada.

Figura 68.

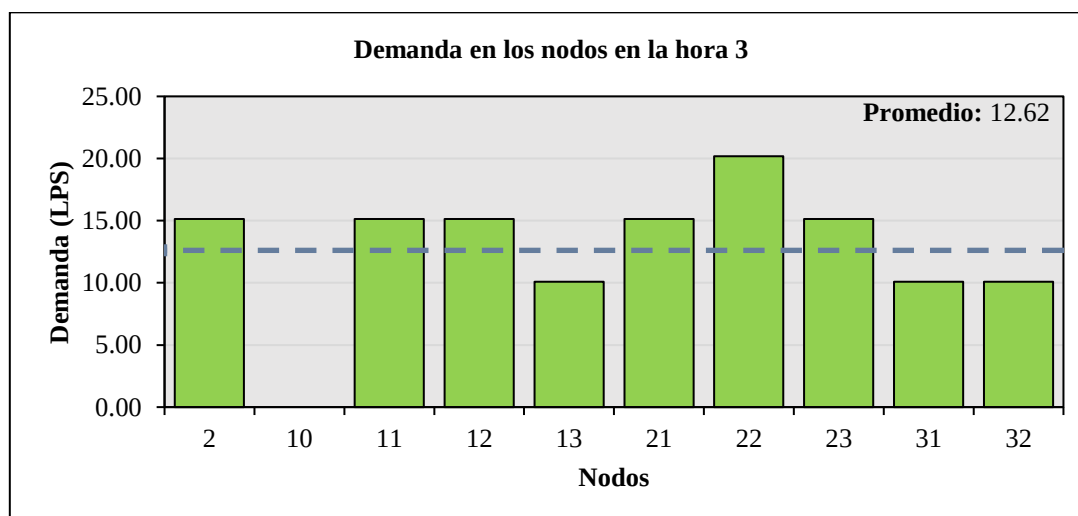
Distribución de presiones en los nodos en la hora 3 para la red Net1 al evaluarla en Epanet



La figura 69 muestra la distribución de demandas en los nodos de la red en la hora de máximo consumo según EPANET. Al contrastarla con la gráfica obtenida en la herramienta desarrollada, se verifica que los valores promedio son idénticos y que los puntos de mayor demanda coinciden. En este caso, el nodo '22' presenta la demanda más alta, alcanzando 20.19 LPS en ambos programas.

Figura 69.

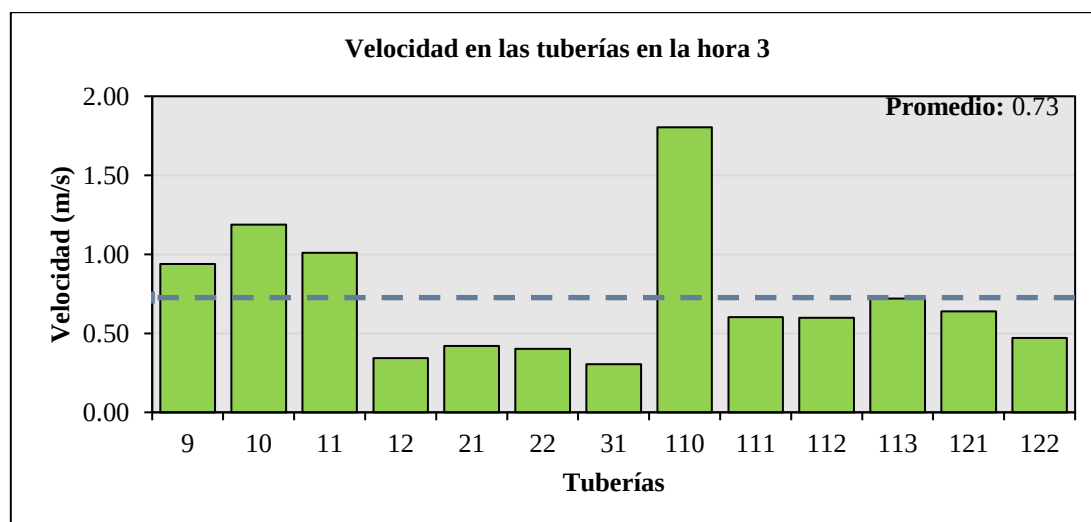
Distribución de demandas en los nodos en la hora 3 para la red Net1 al evaluarla en Epanet



En la figura 70, se presenta la distribución de velocidades en las tuberías en la hora de máximo consumo, según los cálculos realizados en EPANET. La comparación con los resultados de la herramienta confirma que los valores más altos se mantienen en los mismos elementos y con cifras similares. En particular, la tubería con la velocidad más alta, '110', alcanza un valor de 1.80 m/s, lo que demuestra la fidelidad de la modelación en ambos entornos.

Figura 70.

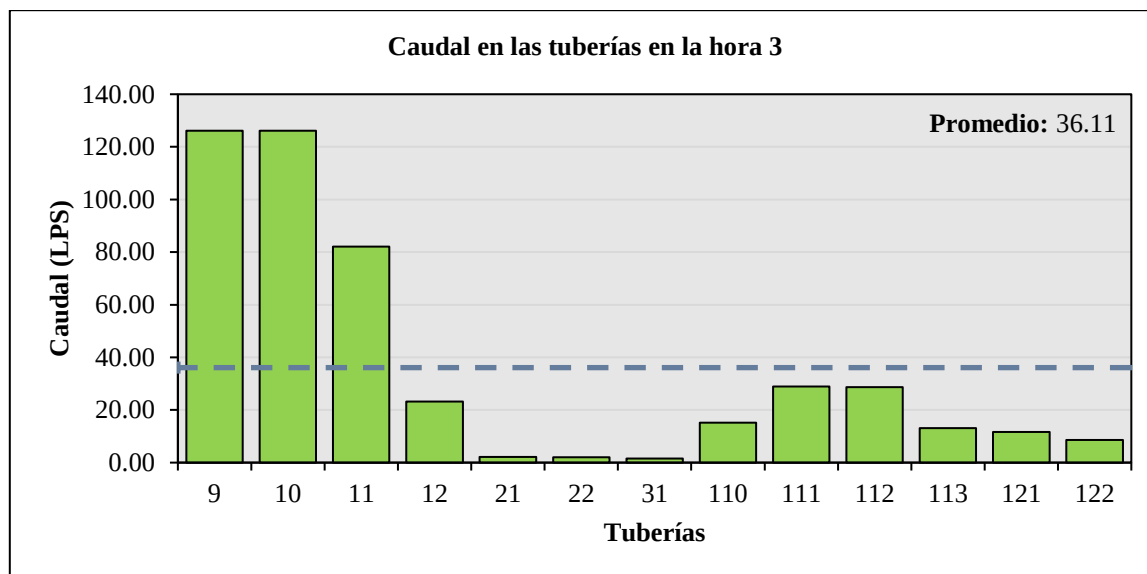
Distribución de velocidades en las tuberías en la hora 3 para la red Net1 al evaluarla en Epanet



Finalmente, la figura 71 muestra la distribución de caudales en las tuberías en la hora de máximo consumo, obtenida mediante EPANET. La comparación con los resultados de la herramienta indica que ambos modelos siguen la misma tendencia en la distribución de caudales, lo que sugiere una representación coherente del flujo en la red. Además, el valor máximo de 126.19 LPS en las tuberías '9' y '10' es el mismo en ambas herramientas, lo que refuerza la validez del modelo desarrollado.

Figura 71.

Distribución de caudales en las tuberías en la hora 3 para la red Net1 al evaluarla en Epanet



4.4.2. Evaluación caso Red_Caso1

Las figuras 72 y 73 muestran los mapas de presión y velocidad de la red en la hora de máximo consumo, hora 9. Los resultados obtenidos con EPANET presentan una distribución similar a los obtenidos con la herramienta desarrollada por los autores, reflejando la misma estructura hidráulica en cuanto a las variaciones espaciales de presión y velocidad.

Además, se observa que los valores obtenidos para cada elemento en este instante de tiempo coinciden con precisión entre ambas herramientas, lo que confirma la consistencia de los cálculos y la confiabilidad del modelo desarrollado.

Este nivel de concordancia sugiere que, para el caso Red_Caso1, la metodología implementada en la herramienta desarrollada permite obtener resultados equivalentes a los de EPANET, validando su aplicabilidad en la modelación de redes de distribución de agua.

Figura 72.

Mapa de presiones en la red Red_Caso1 diseñada al evaluarla en Epanet

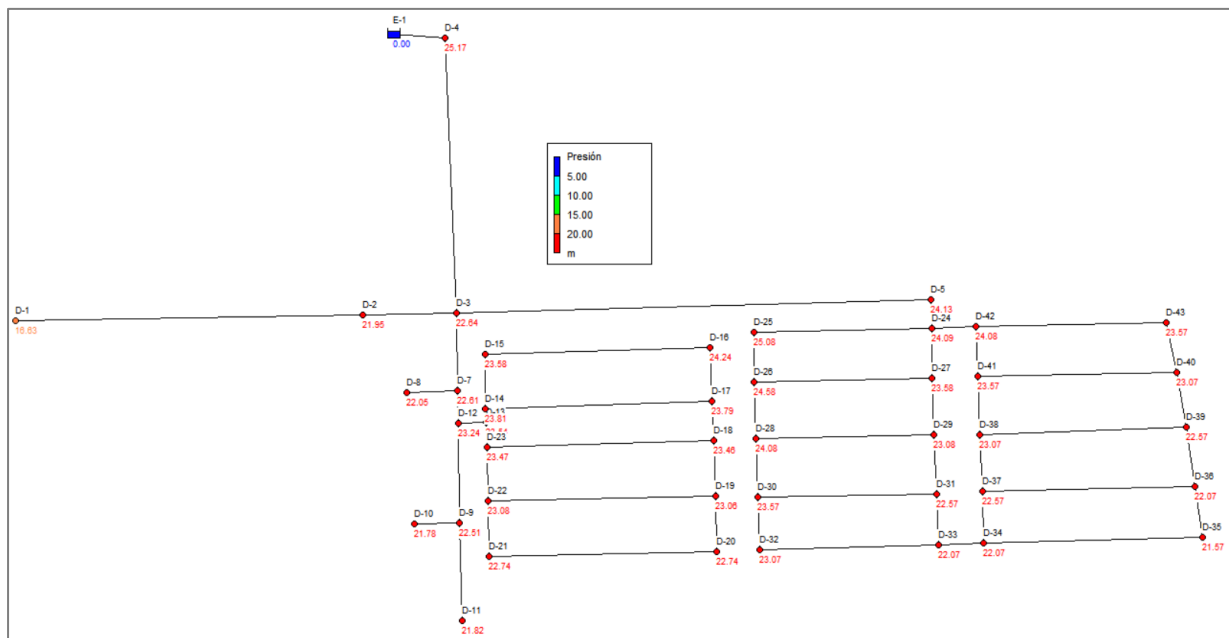
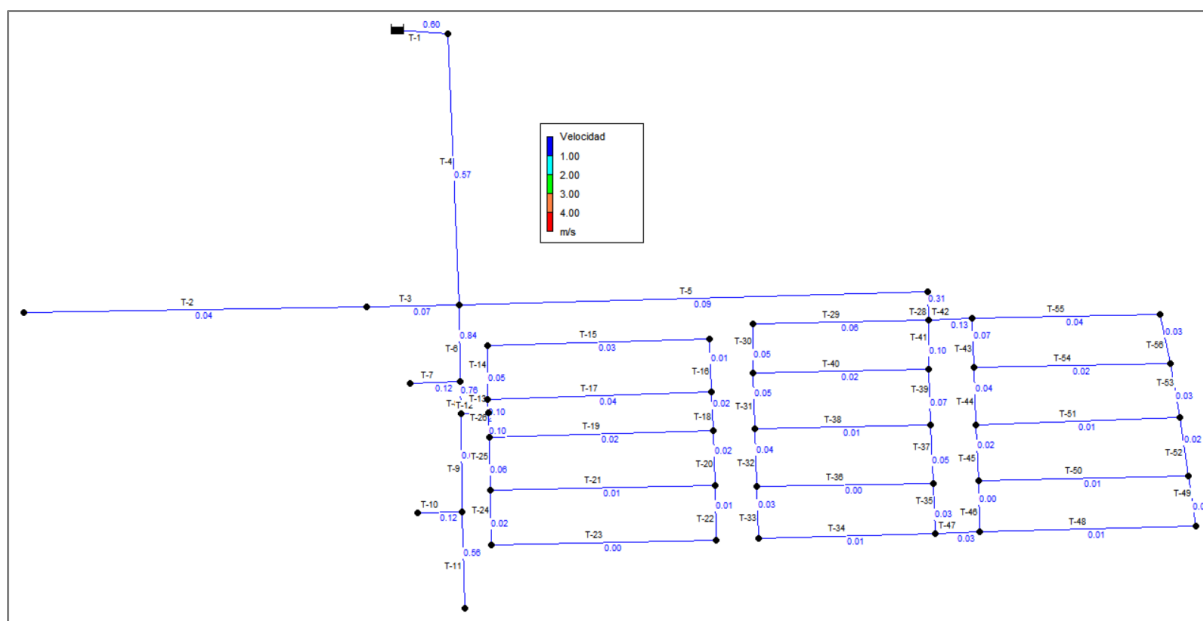


Figura 73.

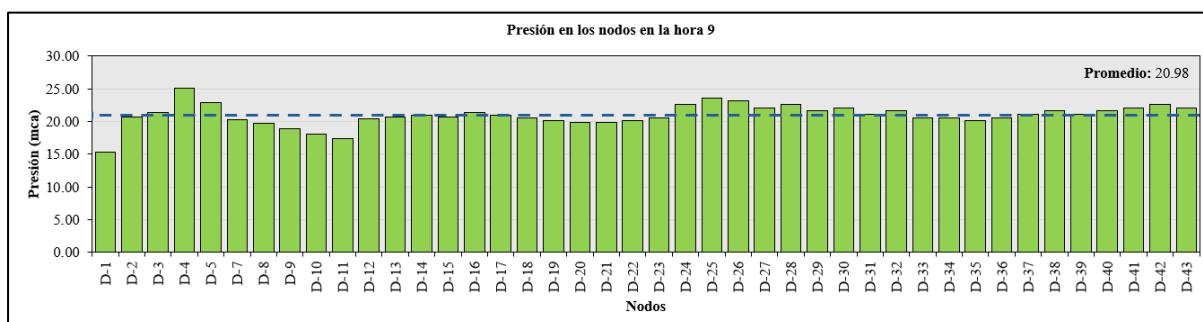
Mapa de velocidades en la red Red_Caso1 diseñada al evaluarla en Epanet



La figura 74 presenta la distribución de presiones en los nodos en la hora de máximo consumo, obtenida mediante EPANET. Al compararla con la gráfica de barras generada por la herramienta desarrollada, se observa que ambas presentan una tendencia similar, lo que indica que la distribución de presiones en la red se representa de manera equivalente en ambos entornos. En particular, el nodo con la presión más alta, 'D-4', alcanza un valor de 25.06 mca, coincidiendo en ambas herramientas.

Figura 74.

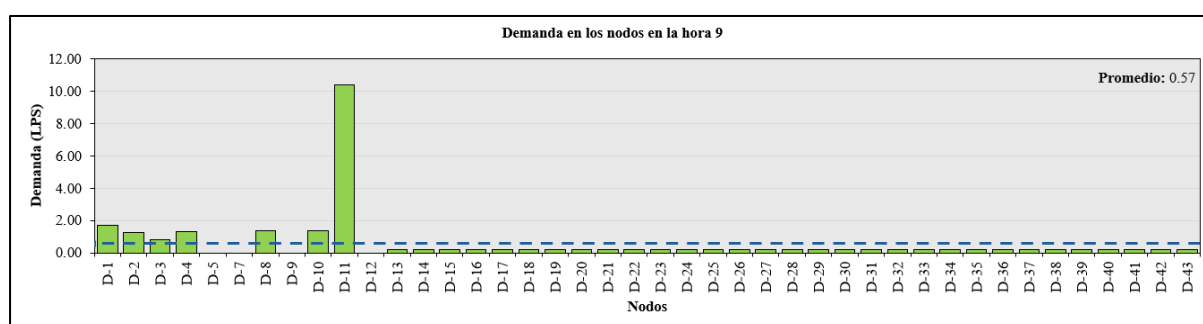
Distribución de presiones en los nodos en la hora 9 para la red Red_Caso1 al evaluarla en Epanet



La figura 75 muestra la distribución de demandas en los nodos en la hora de máximo consumo según EPANET. Al contrastarla con la gráfica obtenida en la herramienta desarrollada, se verifica que los valores promedio son idénticos y que los puntos de mayor demanda coinciden. En este caso, el nodo ‘D-11’ presenta la demanda más alta, alcanzando 10.36 LPS, sin diferencias entre las herramientas.

Figura 75.

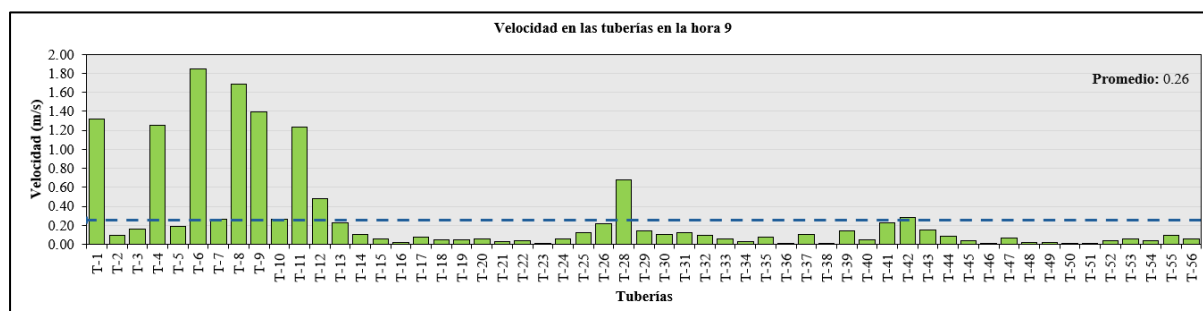
Distribución de demandas en los nodos en la hora 9 para la red Red_Caso1 al evaluarla en Epanet



En la figura 76, se presenta la distribución de velocidades en las tuberías en la hora máxima de consumo, según los cálculos realizados en EPANET. La comparación con los resultados de la herramienta confirma que los valores más altos se mantienen en los mismos elementos y con cifras muy cercanas. En particular, la tubería con la velocidad más alta, tubería ‘T-6’, alcanza un valor de 1.85 m/s, lo que demuestra la fidelidad de la modelación en ambos entornos.

Figura 76.

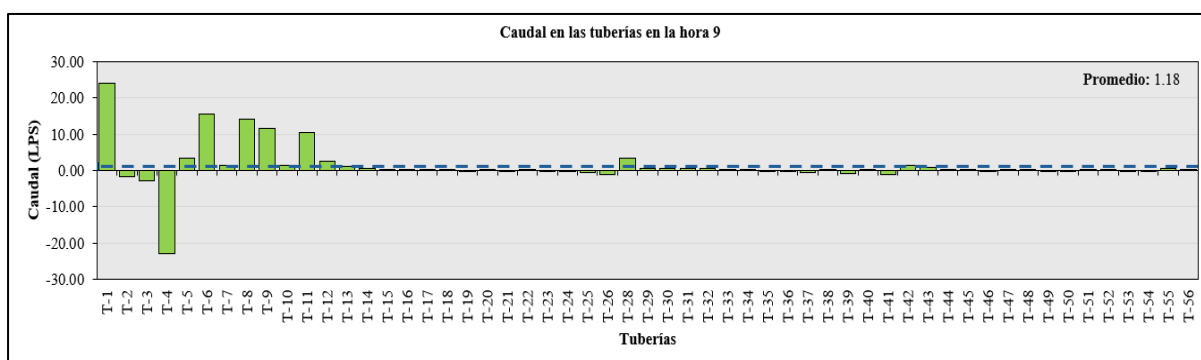
Distribución de velocidades en las tuberías en la hora 9 para la red Red_Caso1 al evaluarla en Epanet



Finalmente, la figura 77 muestra la distribución de caudales en las tuberías en la hora de máximo consumo, obtenida mediante EPANET. La comparación con los resultados de la herramienta indica que ambos modelos siguen la misma tendencia en la distribución de caudales, lo que sugiere una representación coherente del flujo en la red. Además, la tubería con el caudal más alto, tubería 'T-1', presenta un valor de 24.05 LPS, idéntico en ambas herramientas, lo que refuerza la validez del modelo desarrollado.

Figura 77.

Distribución de caudales en las tuberías en la hora 9 para la red Red_Caso1 al evaluarla en Epanet



4.4.3. Evaluación caso red.Qmd

Las figuras 78 y 79 muestran los mapas de presión y velocidad de la red en la hora de máximo consumo, hora 5. Los resultados obtenidos con EPANET presentan una distribución similar a los obtenidos con la herramienta desarrollada por los autores, reflejando la misma estructura hidráulica en cuanto a las variaciones espaciales de presión y velocidad.

Además, se observa que los valores obtenidos para cada elemento en este instante de tiempo coinciden con precisión entre ambas herramientas, lo que confirma la consistencia de los cálculos y la confiabilidad del modelo desarrollado.

Este nivel de concordancia sugiere que, para el caso red.Qmd, la metodología implementada en la herramienta desarrollada permite obtener resultados equivalentes a los de EPANET, validando su aplicabilidad en la modelación de redes de distribución de agua.

Figura 78.

Mapa de presiones en la red red.Qnd diseñada al evaluarla en Epanet

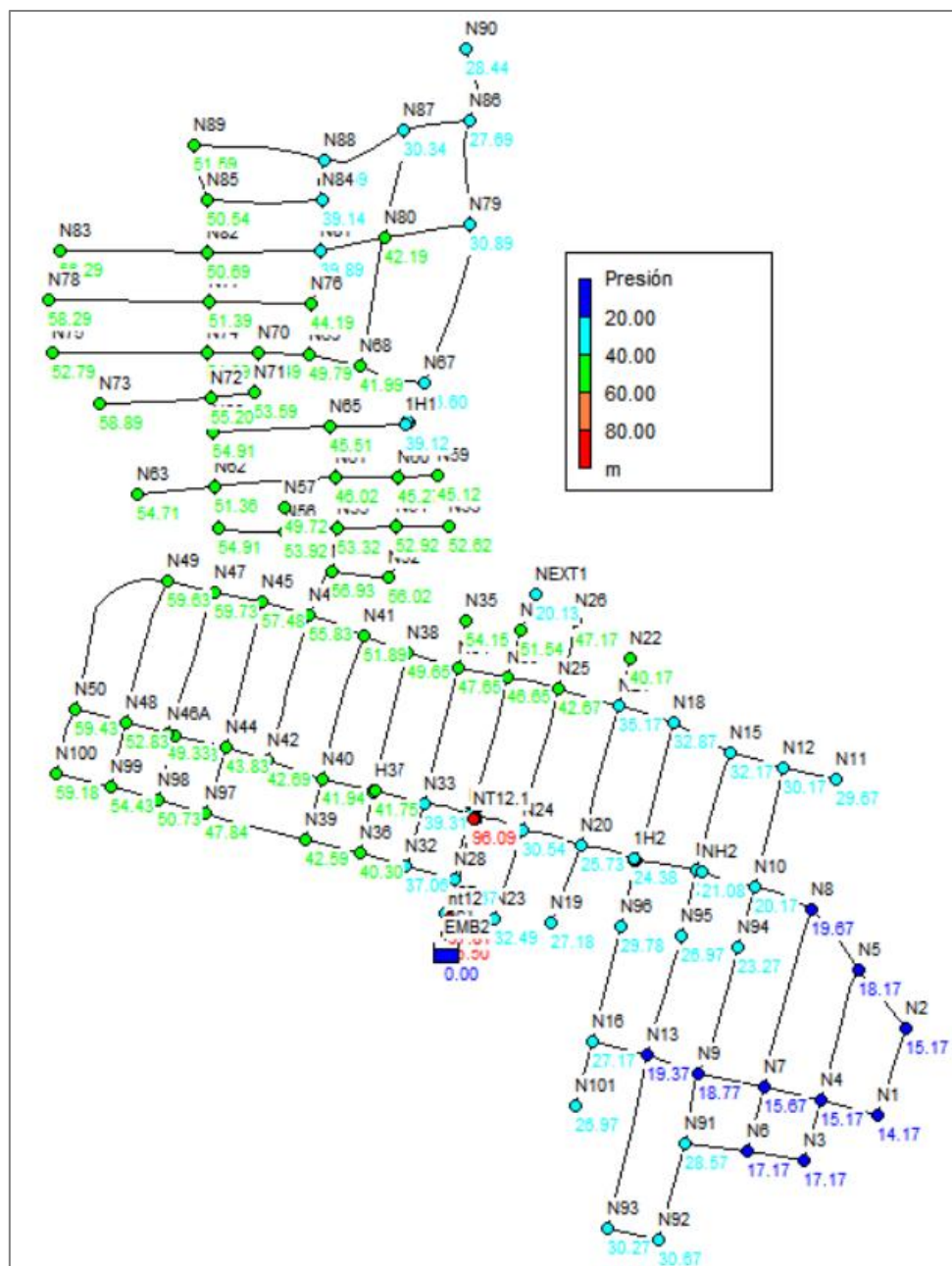
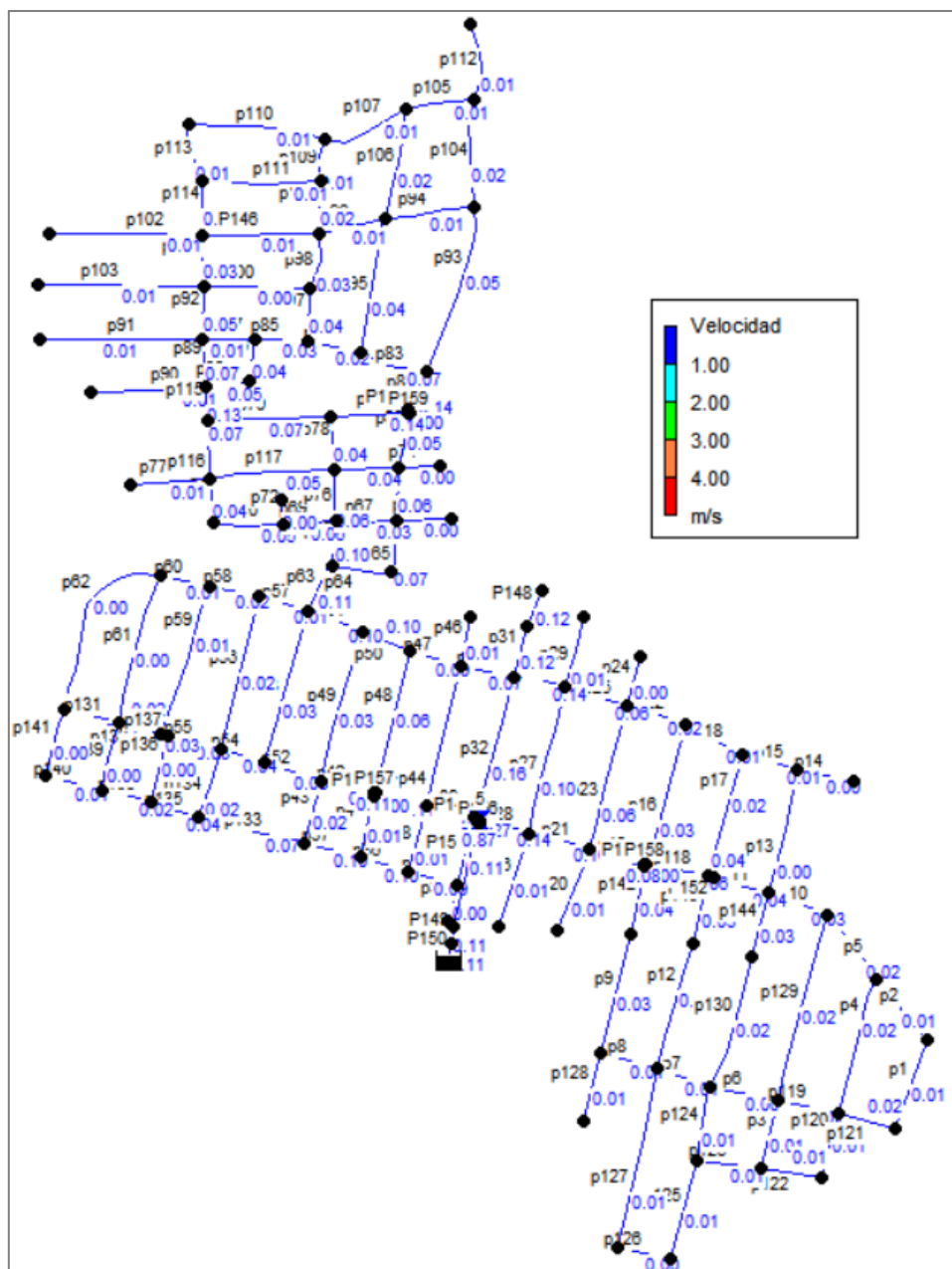


Figura 79.

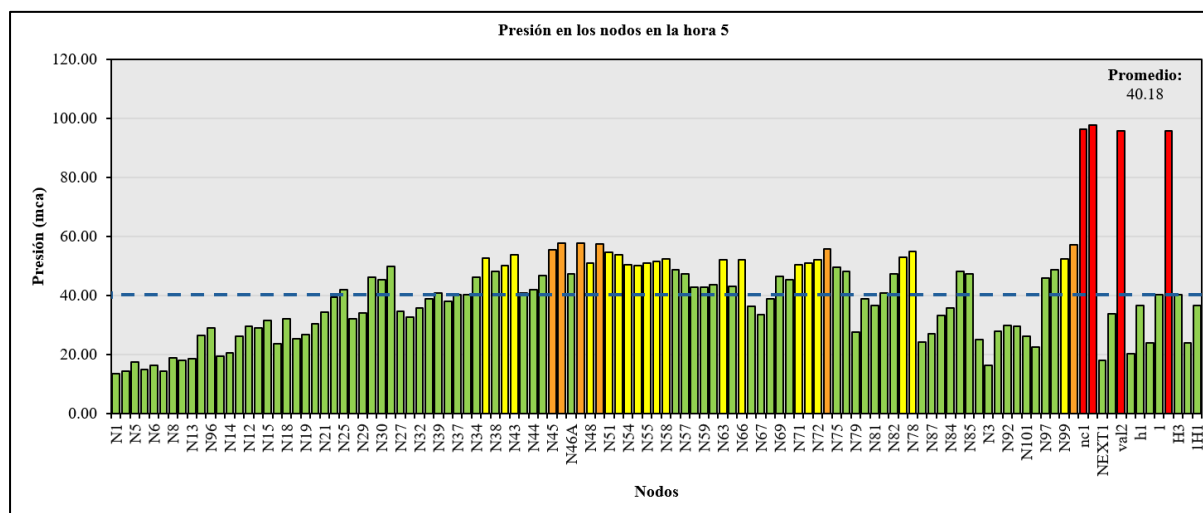
Mapa de velocidades en la red red.Qnd diseñada al evaluarla en Epanet



La figura 80 presenta la distribución de presiones en los nodos en la hora de máximo consumo, obtenida mediante EPANET. Al compararla con la gráfica de barras generada por la herramienta desarrollada, se observa que ambas presentan una tendencia similar, lo que indica que la distribución de presiones en la red se representa de manera equivalente en ambos entornos. En particular, el nodo con la presión más alta, ‘N47’, alcanza un valor de 57.70 mca, coincidiendo en ambas herramientas.

Figura 80.

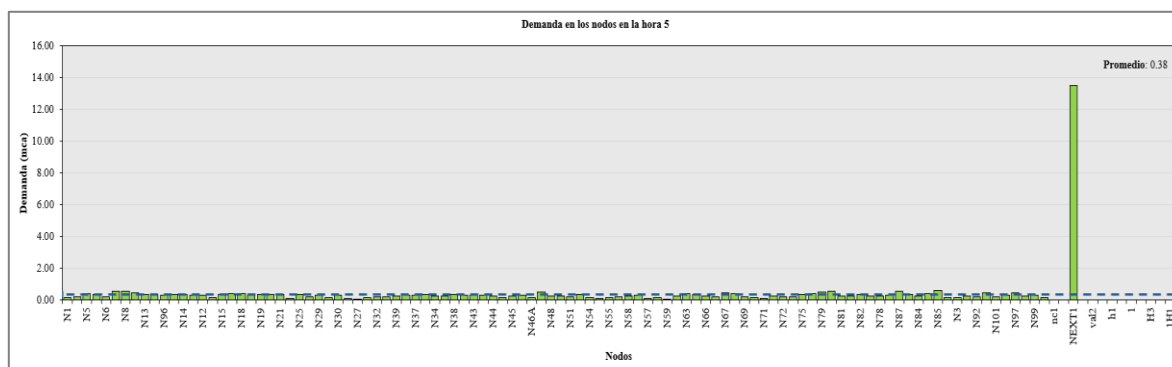
Distribución de presiones en los nodos en la hora 5 para la red red.Qmd al evaluarla en Epanet



La figura XX muestra la distribución de demandas en los nodos en la hora máxima según EPANET. Al contrastarla con la gráfica obtenida en la herramienta desarrollada, se verifica que los valores promedio son idénticos y que los puntos de mayor demanda coinciden. En este caso, el nodo 'NEXT1' presenta la demanda más alta, alcanzando 13.50 LPS, sin diferencias entre las herramientas.

Figura 81.

Distribución de demandas en los nodos en la hora 5 para la red red.Qmd al evaluarla en Epanet

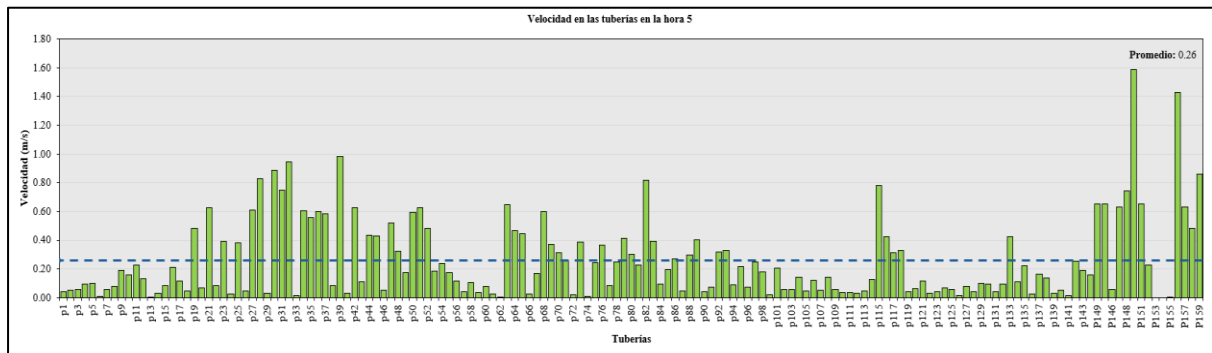


En la figura 82, se presenta la distribución de velocidades en las tuberías en la hora de máximo consumo, según los cálculos realizados en EPANET. La comparación con los resultados de la herramienta confirma que los valores más altos se mantienen en los mismos

elementos y con cifras similares. En particular, la tubería con la velocidad más alta, ‘P145’, alcanza un valor de 1.59 m/s, lo que demuestra la fidelidad de la modelación en ambos entornos.

Figura 82.

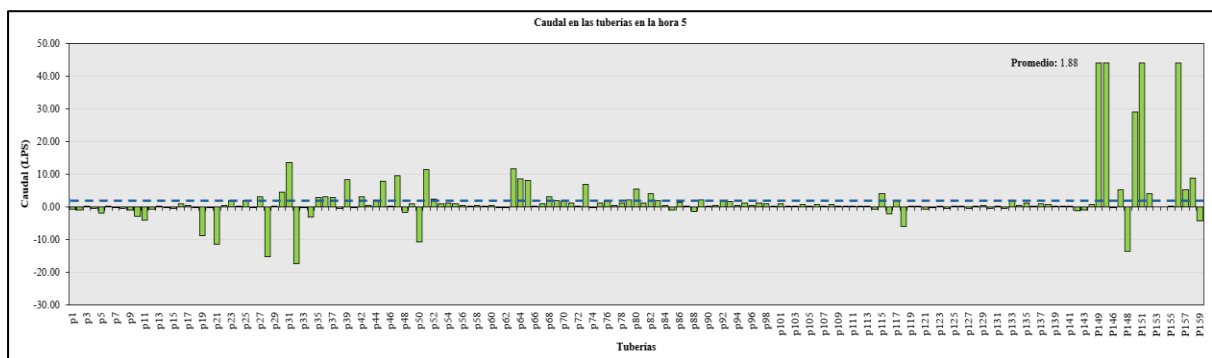
Distribución de velocidades en las tuberías en la hora 5 para la red red.Qmd al evaluarla en Epanet



Finalmente, la figura 83 muestra la distribución de caudales en las tuberías, obtenida mediante EPANET. La comparación con los resultados de la herramienta indica que ambos modelos siguen la misma tendencia en la distribución de caudales, lo que sugiere una representación coherente del flujo en la red. Además, las tuberías con el caudal más alto, ‘P149’, ‘P150’, ‘P151’ y ‘P156’, presentan un valor de 44.05 LPS, idéntico en ambas herramientas, lo que refuerza la validez del modelo desarrollado.

Figura 83.

Distribución de caudales en las tuberías en la hora 5 para la red red.Qmd al evaluarla en Epanet



5. CONCLUSIONES

Se desarrolló un entorno de modelación hidráulica de uso académico compuesto por distintos módulos y funcionalidades que abarcan la carga de datos, el diseño, la simulación, el análisis y la optimización de redes de distribución de agua potable. Este entorno permite evaluar métricas clave como la resiliencia, determinando cuánta energía extra necesita una red para superar fallas. Además, posibilita la simulación de interrupciones, como fugas o terremotos, con el objetivo de diseñar estrategias de reparación que garanticen la operatividad del sistema. Gracias a la integración de gráficos y datos tabulares, se puede analizar con precisión la evolución del comportamiento hidráulico de la red en el tiempo, facilitando la toma de decisiones.

Se implementó correctamente la Resolución 0330 de 2017, normativa colombiana para el diseño de redes de distribución de agua potable, mediante el desarrollo del módulo Diseñar. Este módulo sigue rigurosamente los lineamientos establecidos en la norma, permitiendo realizar diseños eficientes en función de parámetros clave como las áreas de aporte de los nodos, la población y el área total. El proceso iterativo de diseño garantizó el cumplimiento de las condiciones de presión y velocidad, ajustando los diámetros de las tuberías de manera progresiva hasta asegurar la validez de los diseños.

El uso del módulo Diseñar permitió identificar que el diseño iterativo es más eficiente en redes pequeñas y medianas, donde el usuario tiene mayor control sobre los parámetros de entrada. Sin embargo, en redes de mayor tamaño, el proceso se torna más complejo, requiriendo ajustes manuales adicionales debido a la variabilidad de los elementos y sus características y su interacción dentro del sistema.

El análisis de resiliencia se enfocó de dos maneras: cálculo del Índice de Todini para determinar qué tan resiliente es una red y cálculo del Índice de Resiliencia Modificado para evaluar el excedente de energía en una red. A través de métricas de resiliencia máxima, mínima,

media y en hora pico, se logró identificar los momentos en los que las redes eran más vulnerables. Se evidenció que la hora pico de consumo es el período más crítico, ya que puede comprometer la capacidad de la red para cumplir con las presiones y demandas requeridas. Por otro lado, al tener la referencia de la resiliencia máxima, se pudo determinar cuánta energía adicional es necesaria para llevar la red a un estado óptimo, mientras que la resiliencia media facilitó la evaluación general del sistema, concluyendo si es necesario replantear su diseño o implementar mejoras para aumentar su capacidad de respuesta ante adversidades.

Los resultados obtenidos con la herramienta desarrollada fueron validados mediante su comparación con EPANET, demostrando que los valores de presión, velocidad y caudal obtenidos en las simulaciones coinciden con alta precisión en ambas plataformas. Esto confirma la confiabilidad del modelo implementado y su capacidad para representar adecuadamente el comportamiento hidráulico de una red de distribución. La similitud en la distribución espacial de estas variables indica que la metodología utilizada en la herramienta desarrollada es adecuada para la modelación de redes de agua potable.

El módulo Simular Fugas permitió modelar escenarios donde la demanda en la red aumentó drásticamente y las presiones disminuyeron, en algunos casos de manera abrupta, comprometiendo la operatividad del sistema. Se evidenció que una fuga de gran magnitud puede afectar severamente la red, provocando fallas generalizadas en la prestación del servicio.

El módulo Simular Terremoto demostró ser una herramienta útil de uso académico y para la evaluación exploratoria del impacto sísmico en redes de distribución, permitiendo realizar simulaciones probabilísticas en ausencia de datos históricos específicos. Su aplicabilidad se centra en la planificación y en estudios preliminares de vulnerabilidad.

Al realizar simulaciones de terremotos, se demostró el impacto significativo que un sismo puede generar en una red de distribución, afectando gravemente su infraestructura y reduciendo las presiones a valores negativos, lo que impide el suministro de agua a la

población. A través del módulo de terremotos, se realizaron evaluaciones preliminares para analizar el nivel de afectación y la propagación de daños según la curva de fragilidad implementada. Además, se evaluaron estrategias de reparación para mitigar los efectos del sismo y restablecer la red a un estado operativo óptimo.

El análisis de resiliencia y la simulación de eventos disruptivos como fugas y terremotos resaltaron la importancia de diseñar redes con alta capacidad de respuesta ante fallas. Se comprobó que una red con una resiliencia elevada puede resistir estos eventos, logrando mantener el suministro de agua de manera total o parcial. Esto refuerza la relevancia de incorporar métricas de resiliencia en el diseño y gestión de redes de distribución de agua, garantizando la continuidad del servicio incluso en condiciones adversas.

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar algoritmos de optimización, como técnicas heurísticas o de programación matemática, que permitan agilizar el ajuste de los diámetros de las tuberías sin necesidad de intervención manual.

Se recomienda en el futuro incorporar opciones avanzadas de visualización, ya que las herramientas actuales basadas en WNTR y Matplotlib presentan limitaciones para generar representaciones gráficas más detalladas y sofisticadas.

Asimismo, se recomienda la integración de módulos que amplíen las capacidades del entorno, como un módulo de calidad del agua que permita analizar la concentración de trazadores, la edad del agua y la distribución de contaminantes químicos.

Para realizar un análisis de resiliencia preciso, es fundamental contar con un conocimiento sólido del tema. Esto garantizará una comprensión adecuada del comportamiento de la red y permitirá evaluar estrategias efectivas para su mejora.

El módulo Simular Terremoto puede expandirse y optimizarse para ofrecer resultados más realistas. Para ello, se recomienda el uso de datos históricos, la implementación de más funciones probabilísticas y una estructuración adecuada de los estados de daño para construir con exactitud las curvas de fragilidad. Además, se recomienda implementar métodos basados en simulaciones de Monte Carlo para evaluar la incertidumbre en los parámetros sísmicos y en la respuesta de la red, así como incluir diversas metodologías de estimación de daño para seleccionar la más adecuada según el modelo de estudio.

Se sugiere incluir opciones para definir múltiples escenarios sísmicos con parámetros personalizables, lo que permitiría evaluar redes en diferentes niveles de intensidad sísmica y mejorar las estrategias de mitigación.

Implementar técnicas de paralelización y optimización en el código podría reducir los tiempos de cómputo, especialmente en redes grandes y complejas.

Dado el carácter normativo de este trabajo, el uso del entorno debe regirse por las Resoluciones 0330 del 2017 y 799 del 2021, asegurando que todos los cálculos y resultados se alineen con las disposiciones establecidas en dicha normativa.

Para garantizar la calidad del código a largo plazo, se recomienda establecer un proceso de mantenimiento continuo que incluya revisiones periódicas para depuración, optimización y aseguramiento de buenas prácticas. Esto permitirá mantener una estructura limpia, modular y escalable, facilitando futuras mejoras e integraciones.

7. REFERENCIAS

- Abarca Aguilar, D. (2022). Marco de análisis de riesgo multi-amenaza en redes de agua potable. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/189159>.
- Araque Fuentes, D. (2006). Optimización de redes de acueducto con el fin de uniformizar el estado de presiones. Uniandes. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/9010>
- Bonilla, Carlos & Sepúlveda, Aura & Celeita, Johnathan. (2023). Analysis of hydraulic sectorization in water distribution networks implementing Epanet and iDistritos. BISTUA REVISTA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS BASICAS. 21. 1-15. 10.24054/bistua.v21i2.2432.
- Bonilla, Carlos & Tapiero, Diego. (2024). Confección de modelos hidráulicos y análisis de calidad del agua en redes de distribución con QGIS. https://www.researchgate.net/publication/381610377_Confeccion_de_modelos_hidraulicos_y_analisis_de_calidad_del_agua_en_redes_de_distribucion_con_QGIS
- Bonilla, Carlos & Tobo, Leidy & Calderón, Angie. (2022). Análisis estadístico del consumo de agua potable residencial en Toledo, Colombia. BISTUA REVISTA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS BASICAS. 20. 70-75. 10.24054/01204211.v1.n%25i.2022.1319.
- Chu-Ketterer, J., J. Burkhardt, K. Klise, AND T. Haxton. (2022). Chapter 12: Water Network Tool for Resilience. Chapter 12, Juneeseok Lee; Jonathan Keck (ed.), Embracing Analytics in the Drinking Water Industry. IWA Publishing, London, Uk, , 295-323
- Cortés Moreno, A. (2015). Revisión crítica del criterio de índice de resiliencia de una RDAP versus otros índices que describan la confiabilidad de la red. Uniandes. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/17494>
- DataScientest. (2024). IDE: ¿Qué es un Entorno de Desarrollo Integrado?. Obtenido de <https://datascientest.com/es/ide-que-es>

Díaz-Romero, O y Garavito-Romero, M. (2020). Modelación y calibración de la red de distribución del acueducto urbano del municipio de Machetá Cundinamarca.

Disponible en: <https://hdl.handle.net/10983/24997>

(U.S. EPA) U.S. Environmental Protection Agency. Systems measures of water distribution system resilience. Technical Report EPA 600/R-14/383, U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC, 2014.

Fernández, Rafael & Rodríguez Susa, Manuel & Lemus Pérez, Mildred & Giraldo, Iván & Porras, Lina & Martínez, Juliana & Echeverry, Juan & Oliveros, Carlos & Reyes, Juan & León, Nubia & Gutiérrez, Diego. (2023). Evaluación indicativa del riesgo a la calidad del agua frente a amenazas naturales y antrópicas: el caso de Bogotá (Capítulo 1).

https://www.researchgate.net/publication/371156582_Evaluacion_indicativa_del_riesgo_a_la_calidad_del_agua_frente_a_amenazas_naturales_y_antropicas_el_caso_de_Bogota_Capitulo_1

Gamboa-Bohórquez, J y Rico-Rodríguez, J. (2020). Elaboración del modelo hidráulico para la red de distribución de agua potable de Funza Cundinamarca utilizando el software EPANET. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10983/24798>

García Alcaraz, M. (2006). Modelación y simulación de redes hidráulicas a presión mediante herramientas informáticas. [Proyecto Fin de Carrera, Universidad Politécnica de Cartagena].

Gómez Cortés, C. (2021). Calibración de redes de distribución de agua potable a través de inteligencia artificial. Universidad de los Andes. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/53823>

Klise, K.A., Bynum, M., Moriarty, D., Murray, R. (2017). A software framework for assessing the resilience of drinking water systems to disasters with an example

earthquake case study, *Environmental Modelling and Software*, 95, 420-431, doi:
10.1016/j.envsoft.2017.06.022

Klise, K.A., Hart, D.B., Bynum, M., Hogge, J., Haxton, T., Murray, R., Burkhardt, J. (2023).

Water Network Tool for Resilience (WNTR) User Manual: Version 1.0.0. U.S. EPA
Office of Research and Development, Washington, DC, EPA/600/R-20/185, 82p.

López Aburto, C., S. (2020). Desarrollo de una Metodología para la Evaluación de la
Resiliencia de las Redes de Distribución de Agua Atendiendo a Criterios de
Operatividad y Rendimiento.

Minambiente. (2024). Demanda. Obtenido de

[https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-
hidrico/administracion-del-recurso-hidrico/demanda](https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/administracion-del-recurso-hidrico/demanda)

Minvivienda. (2017). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico

– RAS. [https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-
saneamiento-basico/reglamento-tecnico-sector/reglamento-tecnico-del-sector-de-agua-
potable-y-saneamiento-basico-ras](https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basico/reglamento-tecnico-sector/reglamento-tecnico-del-sector-de-agua-potable-y-saneamiento-basico-ras)

Minvivienda. (2021). Resolución 799. [https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-](https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basico/reglamento-tecnico-sector/reglamento-tecnico-del-sector-de-agua-potable-y-saneamiento-basico-ras)

[agua-y-
saneamiento-basico/reglamento-tecnico-sector/reglamento-tecnico-del-sector-
de-agua-potable-y-saneamiento-basico-ras](https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basico/reglamento-tecnico-sector/reglamento-tecnico-del-sector-de-agua-potable-y-saneamiento-basico-ras)

Molina López, G. E. (2011). Modelización con Epanet de las Redes de Transporte de Agua
Potable de la Ciudad de Cartagena.

[https://www.upct.es/hidrom/publicaciones/Tesis_pfc/Gemma_Molina_2011_Proyecto
_Fin_de_Master.pdf](https://www.upct.es/hidrom/publicaciones/Tesis_pfc/Gemma_Molina_2011_Proyecto_Fin_de_Master.pdf)

Nirmal Jayaram, K. Srinivasan. (2008). Performance-based optimal design and rehabilitation
of water distribution networks using life cycle costing. *Water Resources Research*,
44(1): n. p. doi:10.1029/2006WR005316.

- Palacios Capcha, John Paul. (2019). Calibración de modelo del sistema de distribución de agua potable del sector urbano de la ciudad de Huánuco – 2018. Disponible en <https://hdl.handle.net/20.500.13080/5326>
- Pérez, G., García, G., Nocedo de León, I., & García, L. (1996). Metodología de la investigación educacional. Obtenido de Metodología de la investigación educacional.
- Python Software Foundation. (2024). Obtenido de: <https://www.python.org/>
- Ramírez Torres, Y. P. (2019). Lenguaje de programación (Python) y software de diseño (EPANET) para la modelación y simulación de redes de distribución de agua potable [Trabajo de Grado Pregrado, Universidad de Pamplona]. Repositorio Hulago Universidad de Pamplona.
<http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/5749>
- Robert E. Shannon. (1988). Simulación de Sistemas. México: Trillas.
- Robles Velasco, A. (2018). Diseño óptimo de redes de distribución de agua mediante algoritmos de búsqueda tabú. (Trabajo Fin de Máster Inédito). Universidad de Sevilla, Sevilla.
- Rodríguez-Procel, W., & Benavides-Muñoz, H. (2021). Modelación hidráulica y calibración de redes de distribución de agua potable. Tecnología Y Ciencias Del Agua, 12(4), 01-41. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-04-01>
- Rossman, L., H. Woo, M. Tryby, F. Shang, R. Janke, AND T. Haxton. (2020). EPANET 2.2 User Manual. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-20/133
- Saldarriaga , J. (2007). Hidráulica de tuberías abastecimiento de agua, redes, riegos. Obtenido de <https://biblioteca.ugc.edu.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=82432>

Saldarriaga, Juan & Ochoa-Rodriguez, Susana & Rodriguez, D. & Arbelaez, Juliana. (2009).

Water Distribution Network Skeletonization Using the Resilience Concept. 1-13.

10.1061/41024(340)74.

Sánchez Tapiero, D. I. (2017). Diseño implementado con herramientas tecnológicas de las redes de acueducto y alcantarillado sanitario del asentamiento José Bernal municipio de Cúcuta (Norte de Santander) [Trabajo de Grado Pregrado, Universidad de Pamplona]. Repositorio Hualgo Universidad de Pamplona.

<http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/3075>

Solórzano, J. S. (2017). Ejercicios básicos de mecánica de fluidos e hidráulica aplicados a través del software de distribución gratuita EPANET 2.0. Bogotá, Colombia: Departamento de Publicaciones y Comunicación Gráfica de la Universidad Piloto de Colombia.

Todini, E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. Urban Water. Volume 2, Issue 2, Pages 115-122, ISSN 1462-0758, [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00049-2](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00049-2).

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1462075800000492>)

Villagrán Corrales, G. (2018). Simulación y optimización dinámica de redes de agua en Python. (Trabajo Fin de Grado Inédito) Universidad de Sevilla, Sevilla

Yepes , V. (2023). FÓRMULA DE HAZEN-WILLIAMS PARA CALCULAR LAS PÉRDIDAS POR FRICCIÓN EN TUBERÍAS. Obtenido de <https://victoryepes.blogs.upv.es/files/2022/12/Problema-HazenWilliams.pdf>