

Trabajo Fin de Máster
*DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA
PARA LA EVALUACIÓN DE LA
RESILIENCIA DE LAS REDES DE
DISTRIBUCIÓN DE AGUA ATENDIENDO
A CRITERIOS DE OPERATIVIDAD Y
RENDIMIENTO*

Intensificación: *Hidráulica Urbana*

Autor:

López Aburto, Carlos Samuel

Director:

Dr. Iglesias Rey, Pedro Luis

Codirector/es:

Dr. Martínez Solano, Francisco Javier

Dr. Mora Meliá, Daniel

Fecha: Septiembre, 2020



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma



Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto

Título del TFM: Desarrollo de una metodología para la evaluación de la resiliencia de las redes de distribución de agua atendiendo a criterios de operatividad y rendimiento

Title of TFM: Development of a methodology for evaluating the resilience of water distribution networks according to operational and performance criteria

Títol del TFM: Desenvolupament d'una metodologia per a l'avaluació de la resiliència de les xarxes de distribució d'aigua atenent criteris d'operativitat i rendiment

Alumno: Carlos Samuel López Aburto

Director: Dr. Pedro Luis Iglesias Rey

Codirector UPV: Dr. Francisco Javier Martínez Solano

Codirector Externo: Dr. Daniel Mora Meliá

Intensificación Cursada: Hidráulica Urbana

Fecha de Lectura: Septiembre, 2020.

Resumen

Los cambios demográficos y el crecimiento exponencial que han experimentado los centros urbanos en las últimas décadas han requerido la incorporación de principios como sostenibilidad (para las etapas de diseño) y gestión de la infraestructura hidráulica, debido a su implicancia social, económica y política en los asentamientos actuales. Conceptos como la resiliencia son parámetros cada vez más utilizados a la hora de analizar y evaluar la sostenibilidad de diversos tipos de sistemas, incluyendo los Sistemas de Distribución de Agua (SDA).

La resiliencia es un concepto abstracto que por lo general se interpreta como una medida de la capacidad de un sistema para hacer frente ante incertidumbres, la cual habitualmente se caracteriza a través de un índice o indicador. Los índices de resiliencia más utilizados en SDA expresan la relación existente entre el agua suministrada a los usuarios y la demanda correspondiente. Sin embargo, el análisis de la resiliencia de un SDA debe ser evaluado bajo diversos escenarios operativos, incluyendo condiciones de funcionamiento normal, punta y crítico. Cuando se habla de funcionamiento de un SDA en estado crítico se hace referencia a un estado de falla de este, el cual puede tener un origen tanto mecánico (rotura de tuberías, fallas de válvulas de control, fallas de bombas, etc.) como hidráulico (excesos de presión, cambios en la demanda, dimensionamiento inadecuado de las conducciones, envejecimiento de las tuberías, capacidad de almacenamiento insuficiente, capacidad de bombeo insuficiente, etc.).

La capacidad de definir y cuantificar la resiliencia de un SDA es particularmente importante a la hora de tomar de decisiones en beneficio de la población. No obstante, el establecimiento de criterios explícitos que permitan medir la resiliencia ha resultado ser un problema para la comunidad investigadora dada principalmente por la complejidad y la no linealidad de los SDA.

Es por ello, que se ha planteado una metodología práctica y simplificada que permite evaluar y cuantificar la resiliencia de un SDA a través de un indicador, el cual basa su



estructura de cálculo en el análisis energético del sistema, siendo este aplicable tanto para condiciones normales de funcionamiento como al someter al sistema a eventos de fallo controlado, como lo son las roturas de tuberías.

Con la finalidad de probar la aplicabilidad de la metodología desarrollada, se utilizaron SDA tanto reales como sintéticos que cumplieran con las características para ser considerados como casos de estudio. Para el desarrollo de este trabajo se utilizó EPANET 2.2.0 como herramienta para la simulación del funcionamiento de los SDA, en conexión con las funciones y procedimientos de la librería Toolkit, que permiten llevar a cabo procesos como caracterización, análisis y optimización de este tipo de sistemas, reduciendo de esta manera la carga computacional y los tiempos de simulación. En adición, se creó un modelo de simulación práctico y sencillo que permite realizar un análisis y medición de la resiliencia a partir de los modelos matemáticos de los SDA para diversas condiciones de operatividad.

Palabras Clave: Sistemas de distribución de agua, Resiliencia, Indicador, EPANET, Fallo.

Resum

Els canvis demogràfics i el creixement exponencial que han experimentat els centres urbans en les últimes dècades han requerit la incorporació de principis com a sostenibilitat (per a les etapes de disseny) i gestió de la infraestructura hidràulica, a causa de la seua conseqüència social, econòmica i política en els assentaments actuals. Conceptes com la resiliència són paràmetres cada vegada més utilitzats a l'hora d'analitzar i avaluar la sostenibilitat de diversos tipus de sistemes, incloent els Sistemes de Distribució d'Aigua (SDA).

La resiliència és un concepte abstracte que generalment s'interpreta com una mesura de la capacitat d'un sistema per a fer front davant d'incerteses, la qual habitualment es caracteritza a través d'un índex o indicador. Els índexs de resiliència més utilitzats en SDA expressen la relació existent entre l'aigua subministrada als usuaris i la demanda corresponent. No obstant això, l'anàlisi de la resiliència d'un SDA ha de ser avaluat davall diversos escenaris operatius, incloent condicions de funcionament normal, punta i crític. Quan es parla de funcionament d'un SDA en estat crític es fa referència a un estat de falla d'este, el qual pot tindre un origen tant mecànic (ruptura de canonades, falles de vàlvules de control, falles de bombes, etc.) com a hidràulic (excessos de pressió, canvis en la demanda, dimensionamiento inadequat de les conduccions, envelliment de les canonades, capacitat d'emmagatzemament insuficient, capacid.

La capacitat de definir i quantificar la resiliència d'un SDA és particularment important a l'hora de prendre de decisions en benefici de la població. No obstant això, l'establiment de criteris explícits que permeten mesurar la resiliència ha resultat ser un problema per a la comunitat investigadora donada principalment per la complexitat i la no linealitat dels SDA.

És per això, que s'ha plantejat una metodologia pràctica i simplificada que permet avaluar i quantificar la resiliència d'un SDA a través d'un indicador, el qual basa la seua estructura de càlcul en l'anàlisi energètica del sistema, sent este aplicable tant per a condicions normals de funcionament com al sotmetre al sistema a esdeveniments de fallada controlat, com ho són les ruptures de canonades.



Amb la finalitat de provar l'aplicabilitat de la metodologia desenrotlla, es van utilitzar SDA tant reals com sintètics que complien amb les característiques per a ser considerats com a casos d'estudi. Per al desenrotllament d'este treball es va utilitzar EPANET 2.2.0 com a ferramenta per a la simulació del funcionament dels SDA, en connexió amb les funcions i procediments de la llibreria Toolkit, que permeten dur a terme processos com a caracterització, anàlisi i optimització d'este tipus de sistemes, reduint d'esta manera la càrrega computacional i els temps de simulació. En addició, es va crear un model de simulació pràctic i senzill que permet realitzar una anàlisi i mesurament de la resiliència a partir dels models matemàtics dels SDA per a diverses condicions d'operativitat.

Paraules Clau: Sistemes de Distribució d'Aigua, Resiliència, Indicador, EPANET, Fallada.

Abstract

The demographic changes and the exponential growth that urban centers have experienced in recent decades have required the incorporation of principles such as sustainability (for the design stages) and management of hydraulic infrastructure, due to their social, economic and political implications in the current settlements. Concepts such as resilience are parameters that are increasingly used when analyzing and evaluating the sustainability of various types of systems, including Water Distribution Systems (WDS).

Resilience is an abstract concept that is generally interpreted as a measure of the ability of a system to cope with uncertainties, which is usually characterized through an index or indicator. The most used resilience indices in WDS express the relationship between the water supplied to users and the corresponding demand. However, the resilience analysis of an WDS must be evaluated under various operating scenarios, including normal, peak and critical operating conditions. When talking about the operation of an WDS in a critical state, it refers to a state of failure of this, which can have a mechanical origin (broken pipes, control valve failures, pump failures, etc.) as well as hydraulic (excess pressure, changes in demand, inadequate sizing of pipes, aging pipes, insufficient storage capacity, insufficient pumping capacity, etc.).

The ability to define and quantify the resilience of an WDS is particularly important when making decisions for the benefit of the population. However, the establishment of explicit criteria to measure resilience has turned out to be a problem for the research community, mainly due to the complexity and non-linearity of WDSs.

That is why a practical and simplified methodology has been proposed that allows evaluating and quantifying the resilience of an WDS through an indicator, which bases its calculation structure on the energy analysis of the system, being this applicable both for normal conditions such as by subjecting the system to controlled failure events, such as pipe breaks.

In order to test the applicability of the methodology developed, both real and synthetic WDSs were used that met the characteristics to be considered as case studies. For the development of this work, EPANET 2.2.0 was used as a tool for the simulation of the operation of WDSs, in connection with the functions and procedures of the Toolkit library, which allow to carry out processes such as characterization, analysis and optimization of



this type of systems, thus reducing the computational load and simulation times. In addition, a practical and simple simulation model was created that allows an analysis and measurement of the resilience from the mathematical models of the WDSs for various operating conditions.

Key Words: Water Distribution Systems, Resilience, Indicator, EPANET, Failure.

*“Que el canto tiene sentido
cuando palpita en las venas (...)
canto que ha sido valiente,
siempre será canción nueva”*

Víctor Jara

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia quienes han sido el pilar fundamental durante toda mi formación tanto en el ámbito personal, académico como profesional. Gracias por el apoyo incondicional que me han brindado, sin ellos nada de esto hubiese sido posible.

En especial quiero agradecer al Dr. Pedro Luis Iglesias Rey por su constante apoyo, motivación y aporte de conocimiento para el desarrollo del presente trabajo. De manera conjunta, agradecer al Dr. Francisco Javier Martínez Solano y al Dr. Daniel Mora Meliá por su valiosa ayuda a lo largo de este proceso.

Finalmente, quiero agradecer a mis compañeros del máster por todas las vivencias y experiencias compartidas durante este periodo donde me lo he pasado genial.

ÍNDICE

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES Y ALCANCE	1
1.2 JUSTIFICACIÓN	2
1.3 OBJETIVOS	3
1.3.1 Objetivo principal	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
2. CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE	4
2.1 ESTUDIOS DE LA RESILIENCIA EN SDA.....	4
2.2 ENFOQUES DE EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA	5
2.3 AMENAZAS EN LOS SDA.....	7
2.3.1 Amenazas producto de eventos naturales	8
2.3.2 Amenazas producidas por el hombre.....	9
2.4 REVISIÓN DE INDICADORES DE RESILIENCIA.....	9
2.4.1 La entropía del flujo	10
2.4.2 Índice de resiliencia	10
2.4.3 Índice de resiliencia de la red	11
2.4.4 Índice de resiliencia modificada.....	12
2.4.5 Entropía del flujo sensible al diámetro.....	12
2.4.6 Índice de potencia disponible	12
2.4.7 Índice de resiliencia hidráulica de tuberías.....	13
2.4.8 Índice de resiliencia modificado centralizado	14
2.4.9 Estimador de confiabilidad mecánica	14
2.5 EL SOFTWARE EPANET	15
2.5.1 El Toolkit de EPANET	15
3. CAPÍTULO III: METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE UN SDA MEDIANTE INDICADORES DE RESILIENCIA	17
3.1 MODELO INFORMÁTICO PARA LA EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA.....	17
3.1.1 Modelo matemático de una red	18
3.1.2 Conexión de la API de EPANET con el entorno de programación.....	18
3.1.3 Estructura del código	19
3.1.4 Interfaz gráfica.....	20
3.2 CASOS DE APLICACIÓN	22
3.2.1 Fosspoly1	22
3.2.2 Pescara	22
3.2.3 Modena.....	23

3.2.4	KL Network	23
3.2.5	Kentucky 2	24
3.2.6	Balerma	24
3.2.7	Rural Network	25
3.2.8	Kentucky 4	25
3.2.9	Wolf-Cordera Ranch	26
3.2.10	ZJ Network	26
3.3	PRESENTACIÓN DE CASOS	27
3.4	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	29
4.	CAPÍTULO IV: INDICADOR DE RESILIENCIA BASADO EN EFICIENCIA ENERGÉTICA	31
4.1	CONSUMO ENERGÉTICO EN EL CICLO URBANO DEL AGUA	31
4.2	BALANCE ENERGÉTICO ASOCIADO AL TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE AGUA	32
4.3	METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EPR DE UN SDA PARA CONSUMOS INDEPENDIENTES DE LA PRESIÓN	34
4.3.1	Recuperación de energía en la red	34
4.3.2	Ubicación del recuperador de energía	35
4.3.3	Descripción general de la metodología para la recuperación de energía	36
4.3.4	Ejemplo de aplicación de la metodología	38
4.3.5	Índice de energía potencialmente recuperable	39
4.4	CASOS DE APLICACIÓN	41
4.4.1	Anytown System	41
4.4.2	Network 3	42
4.4.3	C-Town	44
4.5	PRESENTACIÓN DE CASOS	46
4.5.1	Aplicación del PREI a la red Anytown System	46
4.5.2	Aplicación del PREI a la red Network 3	53
4.5.3	Aplicación del PREI a la red C-Town	59
4.6	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	66
5.	CAPÍTULO V: INDICADOR DE RESILIENCIA BASADO EN EL DÉFICIT DE ENERGÍA	68
5.1	INTRODUCCIÓN	68
5.2	DESCRIPCIÓN GENERAL	69
5.2.1	Desarrollo de la metodología planteada	70
5.3	DEFINICIÓN DE LOS ÍNDICES DE RESILIENCIA	76
5.3.1	Índice de déficit energético ponderado por la longitud	76
5.3.2	Índice de déficit energético ponderado por el volumen	77
5.3.3	Índice de déficit energético ponderado por la longitud y caudal	77



5.4	CASO DE APLICACIÓN.....	77
5.4.1	BWSN Network 1.....	77
5.4.2	Santa Marta	79
5.5	PRESENTACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO	83
5.5.1	Aplicación de la metodología a la red de BWSN Network 1.....	84
5.5.2	Aplicación de la metodología a la red de Santa Marta Sur	90
5.6	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	96
6.	CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS.....	98
6.1	CONCLUSIONES.....	98
6.2	DESARROLLOS FUTUROS	99
7.	CAPÍTULO VII: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistemas de transiciones y fases de la resiliencia (Nan y Sansavini, 2017).....	6
Figura 2. Amenazas en los SDA.	8
Figura 3. Conexión de la API de EPANET al entorno de programación Visual Studio.	19
Figura 4. Esquema de flujo de los procedimientos del código.	20
Figura 5. Ejecutable desarrollado para el cálculo de la resiliencia de un SDA.	21
Figura 6. Modelo matemático de la red Fosspoly1.	22
Figura 7. Modelo matemático de la red Pescara.....	22
Figura 8. Modelo matemático de la red Modena.....	23
Figura 9. Modelo matemático de la red KL Network.	23
Figura 10. Modelo matemático de la red Kentucky 2.	24
Figura 11. Modelo matemático de la red Balerma.	24
Figura 12. Modelo matemático de la red Rural Network.	25
Figura 13. Modelo matemático de la red Kentucky 4.	25
Figura 14. Modelo matemático de la red Wolf-Cordera Ranch.	26
Figura 15. Modelo matemático de la red ZJ Network.....	26
Figura 16. Diagrama de resultados de los índices de resiliencia RI, NRI, API y MRE para cada una de las redes de estudio.	28
Figura 17. Diagrama de resultados de los índices de resiliencia FE, DSFE, MRI, PHRI y CMRI para cada una de las redes de estudio.	29
Figura 18. Balance energético de un SDA (Iglesias-Castelló et al. 2018).	32
Figura 19. Esquema del funcionamiento de un sistema que incorpora recuperadores de energía.	35
Figura 20. Esquema de ubicaciones de un recuperador de energía.	36
Figura 21. Red de ejemplo A.....	36
Figura 22. Diagrama de flujo de la metodología para la recuperación de energía en un SDA.....	38
Figura 23. Resolución de la red ejemplo A.	39
Figura 24. Modelo matemático de la red Anytown System.	41
Figura 25. Patrón de demanda de los nudos de consumo.....	42
Figura 26. Curva de la bomba.	42
Figura 27. Modelo matemático de la red Network 3.....	43
Figura 28. Patrón de demanda de los nudos de consumo.....	43
Figura 29. Patrones de demanda para los nudos 15, 35 y 123.	44
Figura 30. Patrón de demanda para el nudo 203.....	44
Figura 31. Curvas de las bombas 10 y 335.....	44
Figura 32. Controles de las bombas.	44
Figura 33. Modelo matemático de la red C-Town.	45
Figura 34. Patrones de demanda de los nudos de consumo.....	45
Figura 35. Curva de las bombas PU4, PU5, PU6, PU7, PU8 y PU9.	46
Figura 36. Curvas de las bombas PU10, PU11 y PU13.....	46
Figura 37. Curvas de las bombas PU1, PU2, PU3 y PU12.....	46

Figura 38. Resultante de presiones y caudales circulantes de la red Anytown System para las 09:00 hrs.	47
Figura 39. Resolución de la red Anytown System para las 09:00 hrs.....	48
Figura 40. Resultante de presiones y caudales circulantes de la red Anytown System para las 09:00 hrs una vez instalados los RE.....	48
Figura 41. Evolución temporal del PREI para la red Anytown System.	50
Figura 42. Análisis energético de la aplicación de recuperadores de energía en la red Anytown System.	50
Figura 43. Distribución estadística de los recuperadores de energía en la red Anytown System.	51
Figura 44. Modelo matemático resultante de la red Anytown System.	52
Figura 45. Gráfica de recuperación energética para los dispositivos instalados en la red Anytown System.	52
Figura 46. Resultante de presiones y caudales circulantes de la red Network 3 para las 23:00 hrs.	53
Figura 47. Resolución de la red Network 3 para las 23:00 hrs.	54
Figura 48. Resultante de presiones y caudales circulantes de la red Network 3 para las 23:00 hrs posterior a la aplicación del PREI una vez instalados los RE.....	55
Figura 49. Evolución temporal del PREI para la red Network 3.	56
Figura 50. Análisis energético de la aplicación de recuperadores de energía en la red Network 3.	57
Figura 51. Distribución estadística de los recuperadores de energía en la red Network 3... ..	57
Figura 52. Modelo matemático resultante de la red Network 3.....	58
Figura 53. Gráfica de recuperación energética para los dispositivos instalados en la red Network 3.....	59
Figura 54. Resultante de presiones y caudales circulantes de la red C-Town para las 08:00 hrs.	60
Figura 55. Resolución de la red C-Town para las 08:00 hrs.	61
Figura 56. Resultante de presiones y caudales de la red C-Town para las 08:00 hrs posterior a la aplicación del PREI una vez instalados los RE.....	62
Figura 57. Evolución temporal del PREI para la red C-Town.....	62
Figura 58. Análisis energético de la aplicación de recuperadores de energía en la red C-Town.....	64
Figura 59. Distribución estadística de los recuperadores de energía en la red C-Town.....	64
Figura 60. Modelo matemático resultante de la red C-Town.	65
Figura 61. Gráfica de recuperación energética para los dispositivos instalados en la red C-Town.....	65
Figura 62. Red de ejemplo B. Resultante de presiones y caudales.....	71
Figura 63. Diagrama de flujo de la metodología para evaluar el déficit energético en un SDA.....	72
Figura 64. Escenario 1: Rotura de la tubería L1.	73
Figura 65. Escenario 2: Rotura de L2. Escenario 3: Rotura de L3.....	75
Figura 66. Modelo matemático de la red de BWSN Network 1.....	78
Figura 67. Patrones de demanda de los nudos de consumo Pattern-0 y Pattern-2.	78

Figura 68. Patrones de demanda de los nudos de consumo Pattern-1 y Pattern-4.	79
Figura 69. Curvas de las bombas.	79
Figura 70. Controles simples y programados.....	79
Figura 71. Localización de los embalses y depósitos para la red de Santa Marta.	80
Figura 72. Sectorización de la red de Santa Marta.	81
Figura 73. Modelo matemático del sector sur de la red de Santa Marta.....	82
Figura 74. Patrón de demanda de los nudos de consumo.....	83
Figura 75. Curvas de las bombas Mohan1 y Mohan2 de la estación de Gaira.....	83
Figura 76. Controles de arranque y parada de las bombas.	83
Figura 77. Esquema de las tuberías de distribución y alimentación de la red BWSN Network 1.....	84
Figura 78. Caso A: Evolución temporal del EDI_V para la red BWSN Network 1.	86
Figura 79. Caso A: Evolución temporal del EDI_{LF} para la red BWSN Network 1.	86
Figura 80. Caso B: Evolución temporal del EDI_V para la red BWSN Network 1.	87
Figura 81. Caso B: Evolución temporal del EDI_{LF} para la red BWSN Network 1.	88
Figura 82. Comparativa de los resultados de aplicación del EDI_V para los casos A y B en la red de BWSN Network 1.	89
Figura 83. Comparativa de los resultados de aplicación del EDI_{LF} para los casos A y B en la red de BWSN Network 1.	90
Figura 84. Esquema de las tuberías de distribución, transporte y alimentación de la red Santa Marta Sur.	91
Figura 85. Caso A: Evolución temporal del EDI_V para la red Santa Marta Sur.	92
Figura 86. Caso A: Evolución temporal del EDI_{LF} para la red Santa Marta Sur.	93
Figura 87. Caso B: Evolución temporal del EDI_V para la red Santa Marta Sur.	94
Figura 88. Caso B: Evolución temporal del EDI_{LF} para la red Santa Marta Sur.	94
Figura 89. Comparativa de los resultados de aplicación del EDI_V para los casos A y B en la red de Santa Marta Sur.	96
Figura 90. Comparativa de los resultados de la aplicación del EDI_{LF} para los casos A y B en la red de Santa Marta Sur.	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Amenazas de origen natural en un SDA (Pérez-García et al. 2010).....	8
Tabla 2. Amenazas producidas por el hombre en un SDA (Pérez-García et al. 2010).	9
Tabla 3. Resumen general de las redes de estudio.	27
Tabla 4. Resultantes de los indicadores de resiliencia para cada una de las redes de estudio.....	27
Tabla 5. Consumo energético de las diferentes etapas del ciclo urbano del agua (Iglesias-Castelló et al. 2018)	32
Tabla 6. Balance energético de los principales elementos de la red ejemplo.	39
Tabla 7. Resultados de la aplicación del PREI para la red Anytown System.....	49
Tabla 8. Indicadores de energía de la red Anytown System para las diferentes combinaciones de dispositivos instalados.	53
Tabla 9. Resultados de la aplicación del PREI para la red Network 3.	56
Tabla 10. Indicadores de energía de la red Network 3 para las diferentes combinaciones de dispositivos instalados.	59
Tabla 11. Resultados de la aplicación del PREI para la red C-Town.	63
Tabla 12. Indicadores de energía de la red C-Town para las diferentes combinaciones de dispositivos instalados.	66
Tabla 13. Análisis energético de la red producto de la rotura de la tubería L1.	73
Tabla 14. Parámetros característicos de las tuberías de la red.	74
Tabla 15. Límites de extracción de los embalses para la red de Santa Marta.	80
Tabla 16. Resultados de la aplicación del EDI _V y el EDI _{LF} para la red BWSN Network 1 (Caso A).	85
Tabla 17. Resultados de la aplicación del EDI _V y el EDI _{LF} para la red BWSN Network 1 (Caso B).	87
Tabla 18. Resultados de la aplicación de los EDI para la red de BWSN Network 1.	88
Tabla 19. Tipología de válvulas para la red Santa Marta Sur.....	91
Tabla 20. Resultados de la aplicación del EDI _V y el EDI _{LF} para la red Santa Marta Sur (Caso A).	92
Tabla 21. Resultados de la aplicación del EDI _V y el EDI _{LF} para la red Santa Marta Sur (Caso B).	93
Tabla 22. Resultados de la aplicación del EDI a la red de Santa Marta Sur.	95

ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Capítulo I – Introducción: en este capítulo se presenta la información introductoria que da inicio al presente trabajo, estableciendo los antecedentes generales y el alcance del proyecto de estudio. Además, se presenta tanto el objetivo general como los objetivos específicos a cumplir durante el desarrollo del trabajo.

Capítulo II - Estado del arte: en este apartado se puede encontrar la recopilación de la información sobre los estudios e investigaciones obtenidas a través de la literatura científica acerca de la aplicación del concepto de resiliencia enfocado a los sistemas de distribución de agua. Por otra parte, se presenta la información sobre las herramientas informáticas, las cuales han sido utilizadas para desarrollar el presente trabajo y en las que se sustenta el mismo, como lo es EPANET 2.2.0 y su librería dinámica.

Capítulo III - Metodología para el análisis y evaluación de un SDA mediante indicadores de resiliencia: en este capítulo se puede encontrar la construcción del modelo informático junto con la estructura de los algoritmos de cálculo incorporados para evaluar la resiliencia de los sistemas de distribución de agua. Asociado a la anterior, se puede encontrar los resultados obtenidos de la aplicación de la herramienta informática desarrollada a las redes de agua de estudio y el análisis de estas soluciones.

Capítulo IV - Indicador de resiliencia basado en eficiencia energética: en este apartado se presenta la definición del indicador de resiliencia basado en la energía potencialmente recuperable de la red junto con la metodología asociada al algoritmo de cálculo que incorpora este indicador. Además, se presentan los casos de estudio obtenidos a través de la bibliografía y el detalle de la aplicación de esta metodología a los sistemas de distribución de agua en conjunto con el análisis de los resultados obtenidos.

Capítulo V - Indicador de resiliencia basado en el déficit de energía: en este capítulo se presentan y explican los indicadores de resiliencia propuestos para evaluar los sistemas de distribución de agua, los cuales se basan en el déficit energético producto del fallo de las tuberías que componen la red, junto con la explicación de la metodología asociada al algoritmo de cálculo de estos indicadores. De la misma manera, se presenta el caso de estudio real del sistema de distribución de agua de la ciudad de Santa Marta en Colombia junto con el detalle de la aplicación de esta metodología y las soluciones asociadas a su cálculo.

Capítulo VI - Conclusiones y desarrollos futuros: en este apartado se exponen y recopilan las conclusiones obtenidas con la realización y desarrollo del proyecto de estudio. Así mismo, se presentan aquellas recomendaciones para los futuros trabajos asociados a la temática expuesta y las posibles mejoras a realizar.

Capítulo VII - Referencias bibliográficas: en este capítulo se puede encontrar la recopilación de todas las fuentes bibliográficas de información consultadas y en las cuales se sustenta el desarrollo del presente trabajo.



CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES Y ALCANCE

La seguridad y el bienestar de un asentamiento urbano depende en reiteradas ocasiones de una combinación de bienes esenciales (alimentos, energía, agua) y servicios (bancas, atención médica, transporte público) proporcionado por un conjunto de sistemas calificados como infraestructura crítica. Donde su incapacidad o destrucción causaría un impacto considerable para el asentamiento.

Dentro de estas denominadas infraestructuras críticas se encuentran los Sistemas de Distribución de Agua (SDA), los cuales se definen como una red de varios elementos interconectados, compuesto por reservorios, depósitos, bombas, válvulas y tuberías que comprende una amplia gama de componentes mecánicos, electromecánicos e hidráulicos (Directiva 2008/114/CE del Consejo de Europa, de 8 de diciembre de 2008, sobre la identificación y designación de infraestructuras críticas europeas).

Si bien los SDA están diseñados para dotar a los usuarios de un nivel mínimo aceptable de suministro de agua, considerando estándares medidos generalmente en términos de presión, disponibilidad y calidad del mismo, es ampliamente reconocido que existe una importante incertidumbre dentro de su planificación, diseño y su posterior operación.

A través de los años y mediante el avance tecnológico, se ha logrado regular la monitorización de algunos componentes en un SDA, como las plantas de tratamiento, estaciones de bombeo y depósitos de agua, facilitando así la identificación temprana de aquellas complicaciones que se pueden ir presentando. No obstante, existen otros elementos de difícil acceso los cuales se encuentran enterrados y que presentan una mayor complejidad para evaluar y actuar ante situaciones que alteren su normal funcionamiento.

Bajo determinadas circunstancias el suministro continuo de agua a los usuarios puede verse alterado o interrumpido debido al fallo de alguno de sus componentes producto de desastres naturales, condiciones climáticas adversas, corrosión o presiones hidráulicas que sobrepasan los límites de la estructura. Una falla en el sistema de cualquier índole es capaz

de socavar la integridad en la red si no se actúa de manera rápida y eficaz. En reiteradas ocasiones se debe esperar a que este tipo de situaciones ocurran para tomar las acciones necesarias para solucionarlas, ya que una falla en un SDA no es posible de anticipar, aún cuando por lo general, los grandes elementos que los componen son monitoreados constantemente.

Durante los últimos años, el concepto de resiliencia se ha ido incorporando y utilizando en diferentes escenarios o áreas que van desde estudios sobre los seres humanos y la estructura ambiental que los rodea, hasta complejos sistemas de transporte y planificación urbana. Llegado a este punto, la primera definición de resiliencia fue realizada por el ecologista canadiense Holling (1973), quien la define como *“una medida de la persistencia de los sistemas y de su capacidad para absorber cambios y perturbaciones y mantener las mismas relaciones entre poblaciones o variables de estado”*.

Desde entonces, se han presentado un sinnúmero de definiciones de resiliencia específicas para cada uno de los campos en los que se ha aplicado, donde, los estudios relacionados con los SDA no han sido la excepción. En la actualidad, la capacidad de diseñar y evaluar la resiliencia de los SDA se ha convertido en una de las principales preocupaciones de la comunidad investigadora.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Debido a la propia naturaleza de los SDA es que se encuentran expuestos y vulnerables a diversos tipos de riesgos que pueden tener consecuencias de carácter leve, como el fallo de un depósito o un desperfecto eléctrico en una estación de bombeo, hasta abarcar consecuencias de carácter grave, como un ciberataque o un ataque bio-terrorista. Los accidentes o ataques deliberados son los encargados de poner en manifiesto las debilidades de un sistema de abastecimiento de agua. Con el paso de los años, los fallos inesperados de las tuberías de una red de agua potable son más frecuentes y propensos de lo que se cree.

Suele ser complicado y en ocasiones imposible poder proteger todo un sistema ante eventos disruptivos o cualquier tipo de contingencia. Sin embargo, estudiar determinados tipos de fallo y sus consecuencias permite ayudar a prevenir los efectos adversos que ello conlleva, lo que da origen a la preparación de planes de emergencia. La investigación relacionada con los análisis de la resiliencia y sus enfoques aún permanece abierta, ya que la combinación de posibles escenarios de fallo que existen dentro de un SDA crece exponencialmente con el tamaño de la red.

En la actualidad, la comunidad científica aún no es capaz de establecer un acuerdo bajo una definición universalmente aceptada de resiliencia para un SDA. Según Shin et al. (2018) la resiliencia puede entenderse como la capacidad integral de un sistema para resistir y absorber interrupciones y recuperarse rápidamente a la condición previa a la interrupción. Una de las medidas más utilizadas para evaluar la resiliencia en los SDA está basado en parámetros como indicadores o índices.

El análisis de la resiliencia se ha desarrollado como un enfoque que permite mejorar la capacidad de las infraestructuras con el objetivo de evitar daños ante eventos de perturbación, mitigar las pérdidas y mejorar la capacidad de recuperación posterior a estos eventos. La capacidad de cuantificar un SDA en una variable o parámetro único que refleje el comportamiento ante situaciones disruptivas ha adquirido una importancia significativa a la

hora de tomar decisiones que puedan repercutir en el beneficio de la población atendida por el sistema dada su implicación social, económica y política dentro de los asentamientos urbanos.

En reiteradas ocasiones, los autores de estos indicadores de resiliencia han enumerado determinadas ventajas de carácter teórico de los enfoques que se les han dado a cada uno de ellos, aunque ninguno ha realizado la labor de comparar el rendimiento de estos indicadores de resiliencia bajo las mismas condiciones para un determinado SDA.

Se debe tener en presente que se requiere de esfuerzos computacionales avanzados para llevar a cabo la evaluación de la resiliencia de una red. Debido a esto, dentro de la literatura es posible observar que son limitados los casos de estudio en redes reales sobre la aplicación de indicadores de resiliencia en SDA debido al tamaño y complejidad de estos sistemas. La comunidad investigadora ha utilizado como base de estudio redes o sistemas teóricos simplificados que limitan enormemente la capacidad de transferir estas conclusiones o resultados al intentar aplicarlas a redes reales.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo principal

El presente trabajo tiene como objetivo principal el desarrollar una metodología integral que permita evaluar y cuantificar la resiliencia de un SDA mediante un indicador, ya sea en condiciones normales de funcionamiento como frente al fallo de los elementos que lo componen.

1.3.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos para concretar el cumplimiento del objetivo principal de este trabajo son los siguientes:

- Indagar e identificar en la literatura acerca de estudios relacionados con indicadores de resiliencia enfocados en SDA y realizar una comparativa entre ellos.
- Construir y desarrollar una aplicación informática de tipo académico que permita automatizar las simulaciones y los cálculos hidráulicos mediante la librería dinámica o Toolkit de EPANET 2.2.0, posibilitando su aplicación a modelos matemáticos elaborados en EPANET, tanto en régimen permanente como en periodo extendido.
- Recolectar modelos matemáticos de SDA tanto reales como sintéticos que pueden ser utilizados como casos de estudio para la evaluación de la resiliencia.
- Plantear y presentar una metodología detallada que permita la obtención de un indicador de resiliencia en base a un algoritmo de eficiencia energética para un SDA en condiciones normales de funcionamiento.
- Desarrollar y presentar una metodología que permita la obtención de un nuevo indicador de resiliencia en base al análisis del déficit energético que se produce en un SDA producto del fallo de las tuberías.
- Aplicar las metodologías en los casos de estudio seleccionados.



CAPÍTULO II:

ESTADO DEL ARTE

2.1 ESTUDIOS DE LA RESILIENCIA EN SDA

En las últimas décadas, el estudio de la resiliencia en los SDA se ha convertido en una de las preocupaciones más importantes, no solo para los técnicos de los servicios de agua y la comunidad académica investigadora, sino también para la sociedad en general. Existe un auge de implementar la resiliencia como un parámetro a considerar para mejorar la sostenibilidad de los sistemas hídricos y de sus recursos. La capacidad de evaluar y orientar la mejora de la resiliencia de las infraestructuras hidráulicas es el camino correcto hacia una gestión del agua urbana sostenible en el tiempo. De la misma manera, se requiere de una comprensión acerca del significado de la resiliencia y de su enfoque ligado a los SDA.

La aplicación del concepto de resiliencia en sistemas hídricos y de gestión del agua se da a partir de la interpretación de Holling (1973) quien utilizó el concepto de resiliencia para describir la capacidad que posee un sistema ecológico dinámico de múltiples especies para persistir con la misma estructura básica cuando es sometido a condiciones de estrés. Como resultado de lo anterior, Haines & Hall (1977) introdujeron varios criterios para describir algunas características de los modelos hídricos estudiados respecto a determinadas situaciones durante la etapa de planificación. Durante este mismo periodo, Fiering (1977) desarrolló ciertas medidas de resiliencia para ser aplicadas en la planificación de este tipo de sistemas.

Hashimoto et al. (1982) definieron la resiliencia de un SDA como la inversa del periodo de tiempo esperado en el que el sistema se encuentra en un estado insatisfactorio. Fujiwara & Tung (1991) introducen el concepto de fiabilidad mecánica como el valor esperado a partir de la relación del agua total suministrada y el agua total demandada para todas las posibles combinaciones de escenarios de fallo de tuberías. Por otra parte, Tanyimboh & Templeman (1993) utilizan el estudio de la uniformidad de los flujos que circulan a través de la red como una medida para estimar la resiliencia de un sistema de abastecimiento. Sin embargo, no fue hasta que Todini (2000) formulara el concepto de resiliencia hidráulica como una medida de la capacidad de la red para sobreponerse a condiciones de fallo en el abastecimiento. Este

autor propuso un índice de resiliencia basado en el análisis de flujo de la red en estado estacionario y que relaciona la energía disipada a través de las tuberías, también interpretada como una medida del excedente de energía disponible en el abastecimiento.

Como resultado, y basándose en este índice es que se formulan varios trabajos relacionados con el cálculo de la resiliencia aplicados en SDA. Prasad & Park (2004) modifican el índice de resiliencia de Todini para incluir una medida de redundancia de la red. Jayaram & Srinivasan (2008) proponen la utilización del excedente de potencia suministrada a los usuarios como un porcentaje de la potencia requerida. Raad et al. (2010) estiman medidas sustitutivas del índice de resiliencia centrándose específicamente en el diseño de una red de agua. Baños et al. (2011) proponen una extensión del índice de resiliencia considerando una amplia variedad de fallos de la red bajo diversos escenarios de demanda. Trifunović (2012) analiza las propiedades hidráulicas de una red de agua basándose en análisis estadísticos de parámetros como presión o demanda con el objetivo de evaluar la resiliencia en condiciones normales de funcionamiento. Yazdani et al. (2011) incorporan la utilización de la teoría de grafos para formular medidas que permitan evaluar la resiliencia topológica de un SDA. Liu et al. (2014) proponen la incorporación de la variación del diámetro en la medida formulada por Tanyimboh y Templeman. Di Nardo et al. (2013) incluyen el índice de resiliencia como parámetro principal para estudiar la sectorización de un SDA. Wright et al. (2015) evaluaron la resiliencia de una red considerando topologías dinámicas y la cantidad de demanda satisfecha en caso de eventos de falla. Liu et al. (2016) utilizan el principio de conservación de la energía para establecer una medida de energía disponible en la red. Paez & Fillion (2019) presentan un estimador del valor esperado de la relación oferta y demanda total de la red considerando escenarios de fallas mecánicas como medida de resiliencia.

Existe un gran número de definiciones e interpretaciones de la resiliencia. En particular, es de destacar la definición Butler et al. (2014) quienes caracterizan la resiliencia como el grado en que el sistema minimiza el nivel de magnitud de la falla de servicio y la duración durante su vida útil de diseño cuando está sujeto a condiciones excepcionales. Esencialmente, es una medida de cómo funciona un sistema cuando se encuentra sujeto a amenazas inesperadas que exceden las condiciones de diseño y el sistema no puede cumplir con el nivel de servicio requerido.

La resiliencia como parte de la ingeniería de sistemas se puede caracterizar en términos generales de dos formas relacionadas, pero con un enfoque distinto, basada en atributos y basada en el rendimiento. La resiliencia basada en atributos hace referencia al sistema en su conjunto como principio de diseño, como por ejemplo el grado de interconexión o robustez, que permite evaluar cómo el sistema responde a cualquier tipología de amenaza. Por otra parte, la resiliencia basada en el rendimiento, el cual se sustenta en el desempeño definido del sistema al responder a una amenaza particular, o bien basado en estándares, el cual se refiere a un objetivo operativo alcanzable.

2.2 ENFOQUES DE EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA

La definición de resiliencia propuesta por Nan & Sansavini (2017) describe la resiliencia como la capacidad de un sistema para resistir los efectos de una fuerza disruptiva y reducir las desviaciones de rendimiento. Con respecto a esta definición, es posible desarrollar la resiliencia como la capacidad que posee un sistema para resistir un cambio o un evento disruptivo al reducir los impactos negativos iniciales (capacidad de absorción), al adaptarse a

ellos (capacidad de adaptación) y al recuperarse de ellos (capacidad de recuperación) como se puede observar en la Figura 1.

- La capacidad de absorción hace referencia a la capacidad endógena del sistema para reducir los impactos negativos causados por eventos disruptivos y minimizar las consecuencias. Esta capacidad puede mejorar al aumentar la redundancia o robustez del sistema.
- La capacidad de adaptación se basa en la capacidad endógena del sistema para adaptarse a eventos disruptivos a través de la autogestión para minimizar las consecuencias. Los sistemas de emergencias pueden ser utilizados para mejorar la capacidad de adaptación.
- La capacidad restaurativa se expresa como la capacidad del sistema para ser reparado. Esta capacidad puede mejorar integrando sistemas de monitorización automatizado en tiempo real como lo son los sistemas de control y supervisión y adquisición de datos (SCADA).

Fortalecer o mejorar cualquiera de estas características permitirá aumentar la resiliencia del sistema ante los diversos eventos disruptivos inesperados a los que se pueda ver enfrentado.

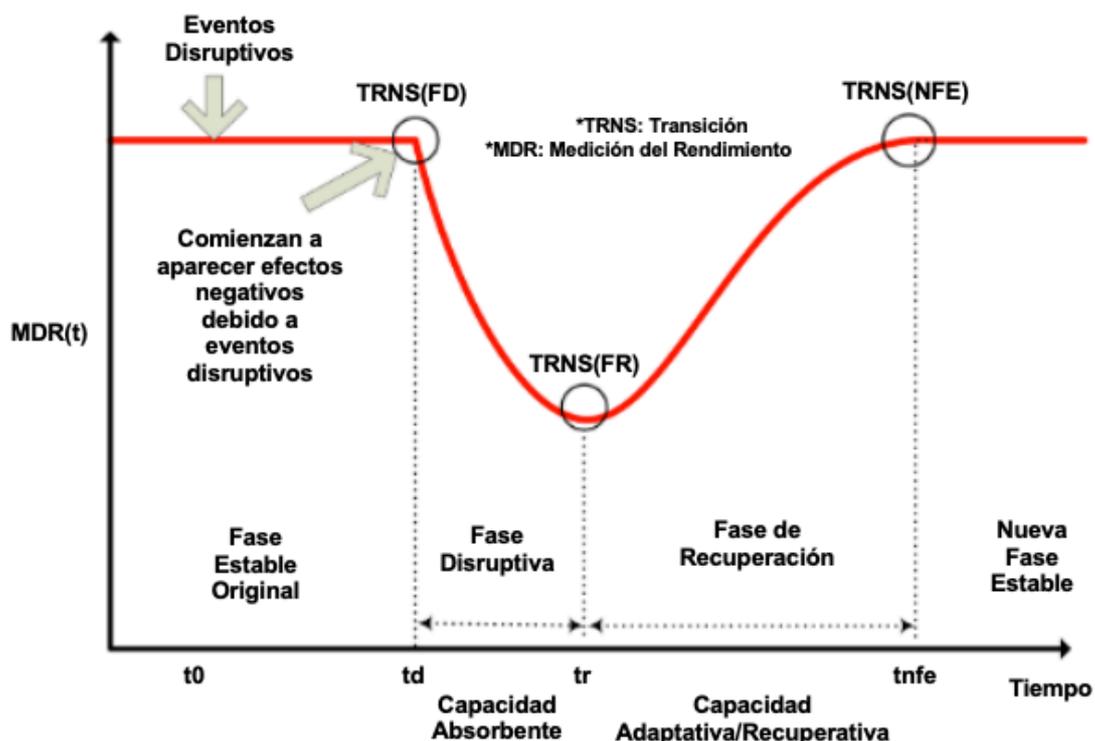


Figura 1. Sistemas de transiciones y fases de la resiliencia (Nan y Sansavini, 2017).

La topología en mallada o en bucle dentro de los SDA permite la redundancia, lo que asegura que el sistema tenga la capacidad suficiente para hacer frente a fallas localizadas y poder garantizar el cumplimiento de la demanda a los usuarios. Es así como se introduce el concepto de fiabilidad dentro de los SDA, que puede entenderse como la capacidad de proporcionar un suministro adecuado tanto en condiciones normales como anormales.

Dentro de la literatura es posible diferenciar tres tipos de fiabilidad ligados al concepto de resiliencia dentro de un SDA las cuales son hidráulica, mecánica y de la calidad. La fiabilidad mecánica hace referencia a la funcionalidad de un sistema SDA bajo incertidumbre mecánica como los fallos de componentes (rotura de tuberías, o fallo de una bomba). La fiabilidad hidráulica mide la funcionalidad del SDA bajo incertidumbre hidráulica a lo largo del tiempo como lo es en situaciones de variación de la demanda debido al crecimiento poblacional, al cambio climático o al deterioro de las tuberías con el tiempo. La fiabilidad de la calidad en un SDA mide la calidad del agua entregada a los usuarios o consumidores bajo cualquier incertidumbre mecánica o hidráulica a lo largo del tiempo (Atkinson et al. 2014).

La mayoría de los métodos existentes para cuantificar la resiliencia carece de la capacidad de cubrir todas las fases e incluir todas las capacidades de resiliencia. Algunos métodos cuantitativos para estimar la resiliencia no son consistentes con el concepto intrínseco de la resiliencia, por ende, la investigación centrada en estimar la resiliencia de las infraestructuras interdependientes aún se encuentra en una etapa temprana.

2.3 AMENAZAS EN LOS SDA

Una amenaza se define como la probabilidad de ocurrencia de un evento o suceso potencialmente desastroso durante un cierto periodo de tiempo en un lugar determinado. Por otra parte, el riesgo se define como el grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un evento o suceso y como una función de la amenaza y la vulnerabilidad. Dada su propia naturaleza, la complejidad que presentan los SDA los hace vulnerables a diversos tipos de amenazas o riesgos, los cuales pueden ir desde el grado leve, como un incendio en una estación de bombeo o el fallo de un depósito, hasta amenazas más graves, como un hipotético ataque bioterrorista.

Proteger completamente un SDA contra todo tipo de amenazas resulta una labor prácticamente imposible. No obstante, estudiar y analizar todas las posibilidades de fallo del sistema y sus consecuencias es una práctica que se está desarrollando con el objetivo de prevenir los efectos adversos ante cualquier evento que implique un riesgo para los consumidores, ya sea de forma directa o indirecta, tanto si proviene de un evento accidental como deliberado.

En una primera instancia, los daños en un SDA pueden clasificarse dentro de tres categorías como lo son:

- 1) Daños físicos en el sistema: se hace referencia a todos aquellos daños que dejan fuera de servicio la totalidad o parte del sistema. Además, se incluyen aquellos daños en las fuentes de abastecimiento, plantas de tratamiento, depósitos de almacenamiento, estaciones de bombeo y los sistemas de conducción de agua.
- 2) Daños en los sistemas de información y comunicaciones: dentro de este apartado se encuentran todos aquellos daños a elementos de medida y seguridad, líneas de transmisión y todo el software y hardware empleado para la operación y control del sistema.
- 3) Daños para los usuarios: en esta categoría se incluyen todos los daños en la calidad del agua servida, bien sea por causa de fuentes biológicas, químicas o radiactivas.

Los daños asociados a estas categorías pueden traer consecuencias de mayor o menor importancia. Dado su origen, las amenazas que producen estos daños se pueden clasificar

en naturales o producidas por el hombre, que a su vez pueden ser inherentes a ataques, accidentes, fallos y amenazas psicológicas como se puede observar en la Figura 2.

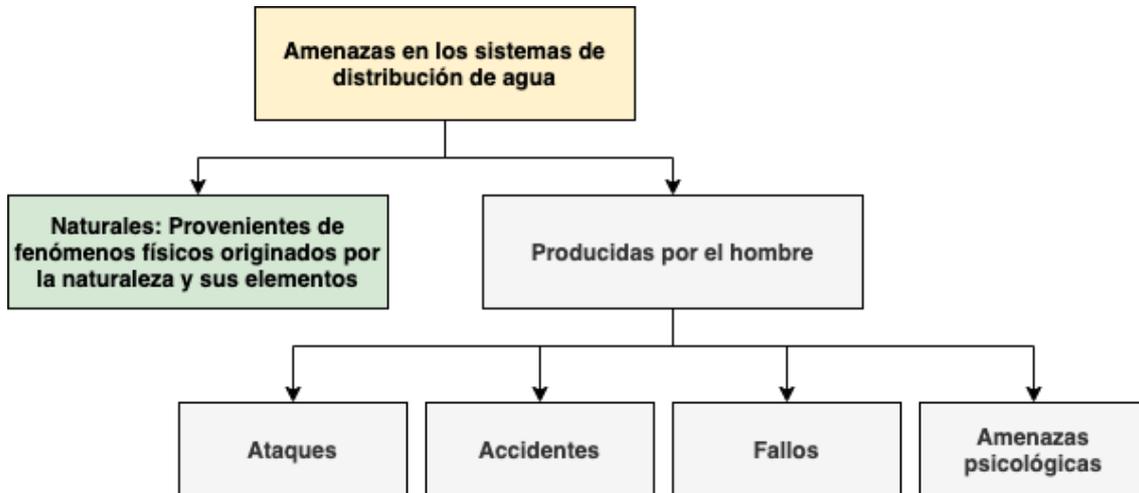


Figura 2. Amenazas en los SDA.

2.3.1 Amenazas producto de eventos naturales

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.

A continuación, en la Tabla 1 se muestran aquellas amenazas producto de fenómenos naturales que pueden afectar a los sistemas de abastecimiento de agua y sus consecuencias asociadas.

Tabla 1. Amenazas de origen natural en un SDA (Pérez-García et al. 2010).

Tipos de Amenazas o Peligros	Consecuencias
Terremoto	- Rotura de tuberías - Pérdidas de presión - Colapso de estructura
Inundación	- Pérdidas de la planta de tratamiento - Contaminación del sistema de distribución
Sequía	- Escasez de agua - Exceso de polvo - Problemas de la calidad del agua
Viento (huracanes, tornados)	- Problemas inducidos por las inundaciones - Daños en la estructura - Pérdida de energía
Clima severo (frío, calor, nieve, hielo)	- Tuberías heladas - Interrupciones y pérdidas (fugas) - Aumento de la demanda del agua

2.3.2 Amenazas producidas por el hombre

Las amenazas producidas por el hombre se encuentran envueltas en incertidumbres inherentes y en el caso de ataques deliberados no existe un patrón probabilístico que permita establecer su ocurrencia. Los ataques deliberados constituyen un conjunto de eventos independientes entre sí, condicionados en ocasiones por la coyuntura sociopolítica y por la oportunidad previa de otros ataques. Como paradigma de los actos deliberados se encuentran los ataques terroristas, que han tomado un gran protagonismo mediático en los años posteriores al 11 de septiembre de 2001.

A continuación, en la Tabla 2 se muestran aquellas amenazas producto de la intervención humana que pueden afectar a los sistemas de abastecimiento de agua y sus consecuencias asociadas.

Tabla 2. Amenazas producidas por el hombre en un SDA (Pérez-García et al. 2010).

Tipos de Amenazas o Peligros		Consecuencias
Ataques (terrorismo, vandalismo, sabotaje)	Físicos	<ul style="list-style-type: none"> - Destrucción física de los bienes del sistema o interrupción del abastecimiento de agua - La pérdida de presión del agua compromete las capacidades de los servicios contra incendios y podría llevar a una posible acumulación de bacterias en el sistema - Potencial para crear un fenómeno transitorio mediante la apertura y cierre de válvulas de control más importantes y encendido y apagado muy rápido de las bombas que pudiera provocar roturas simultáneas de la tubería
	Cibernéticos	<ul style="list-style-type: none"> - Interrupción física de la red de Supervisión, control y Adquisición de Datos (Supervisory Control and Data Acquisition-SCADA) - Ataques en el sistema de control central para provocar fallos simultáneos - Ataques usando virus y gusanos informáticos - Cambiar u ocultar datos para neutralizar la cloración o no añadir desinfectantes permitiendo la aparición de microbios
	Químicos y Biológicos	<ul style="list-style-type: none"> - Afectación grave a la calidad del agua - Problemas de salud y muertes entre los usuarios del sistema - Pánico - Pérdida de la confianza en los consumidores
Accidentes (transportación, construcción, liberación de materiales peligrosos, incendios)		<ul style="list-style-type: none"> - Contaminación de fuentes de agua - Pérdida de instalaciones y estructuras vitales - Roturas e interrupciones del suministro
Fallos (del sistema, de energía)		<ul style="list-style-type: none"> - Pérdida de la capacidad y funcionamiento del sistema - Pérdida del control del sistema
Amenazas psicológicas (desinformación, falsas llamadas de emergencia)		<ul style="list-style-type: none"> - Pérdida de la confianza pública - Incitación al pánico

2.4 REVISIÓN DE INDICADORES DE RESILIENCIA

Los indicadores de resiliencia orientados a SDA pueden reflejar el grado en que el sistema es capaz de continuar proporcionando niveles adecuados de servicios durante eventos no planificados como la falla de alguno de sus componentes.

A pesar de que muchos de estos indicadores son desarrollados para dar una visión global acerca del comportamiento del sistema en su funcionamiento, el objetivo principal de estos indicadores es brindar un valor numérico a un proceso complejo. De la misma manera, permiten analizar con una mirada objetiva el estado de la red y la capacidad propia que posee tanto en etapas de diseño como en el proceso de funcionamiento y proyección futura.

Se han formulado y desarrollado diversos indicadores de resiliencia, que involucran desde simple topología o conectividad de la red hasta indicadores más complejos que envuelven el funcionamiento hidráulico del SDA. Es posible identificar a simple vista que cada indicador por sí solo tiene sus propias fortalezas y debilidades. Típicamente estos indicadores solo son capaces de capturar hasta cierto punto las características propias de un SDA.

A continuación, se detallan los nueve indicadores de resiliencia los cuales serán utilizados para analizar y evaluar la resiliencia de diversos SDA.

2.4.1 La entropía del flujo

La Entropía del Flujo (FE) presentada por Tanyimboh & Templeman (1993) mide la uniformidad de los flujos en la red. Así mismo, se espera que un sistema con una mayor uniformidad sea más fiable, puesto que posee una mayor capacidad de propagación para transmitir los flujos requeridos. Este indicador de tipo probabilístico puede tomar valores superiores a cero ($0 \leq FE$). Matemáticamente se expresa como:

$$FE = - \sum_{k \in IN} \frac{D_{out_k}}{T} \cdot \ln\left(\frac{D_{out_k}}{T}\right) - \sum_{i=1}^N \frac{T_i}{T} \cdot \left[\frac{D_i}{T_i} \cdot \ln\left(\frac{D_i}{T_i}\right) + \sum_{i \in ND_j} \frac{q_{ij}}{T_i} \cdot \ln\left(\frac{q_{ij}}{T_i}\right) \right] \quad (1)$$

Donde:

- IN es el conjunto de nudos origen o fuentes.
- D_{out_k} es el flujo total que suministra el nudo origen k .
- N corresponde al conjunto de nudos de consumo.
- T es el flujo total suministrado a todos los nudos de consumo.
- T_i corresponde al flujo total entrante al nudo de consumo i .
- D_i es la demanda del nudo de consumo i .
- ND_j es el conjunto de tuberías aguas abajo del nudo de consumo i .
- q_{ij} es el flujo saliente del nudo de consumo i a través de la tubería j .

2.4.2 Índice de resiliencia

El Índice de Resiliencia (RI) formulado por Todini (2000) plantea 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 ($0 \leq RI \leq 1$). Matemáticamente se expresa como:

$$RI = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^{N_{inst}} D_{i,t} \cdot (H_{i,t} - H_{i,t}^{(req)})}{\sum_{k=1}^R \sum_{t=0}^{N_{inst}} D_{out_{k,t}} \cdot H_{k,t} + \sum_{j=1}^P \sum_{t=0}^{N_{inst}} \left(\frac{P_{j,t}}{\gamma}\right) - \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^{N_{inst}} D_{i,t} \cdot H_{i,t}^{(req)}} \quad (2)$$

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

$$P_{j,t} = \frac{\gamma \cdot Q_{j,t} \cdot H_{j,t}}{\eta_{j,t}} \quad (3)$$

Donde:

- N_{inst} es el total de instantes de tiempo durante los cuales se realiza el análisis o la simulación.
- R es el conjunto de nudos origen o fuentes.
- P corresponde al conjunto de bombas.
- $D_{i,t}$ es la demanda del nudo de consumo i en el instante t .
- $H_{i,t}$ es la cabeza calculada en el nudo de consumo i en el instante t .
- $H_{i,t}^{(req)}$ es la cabeza mínima requerida en el nudo de consumo i para el instante t .
- $D_{out_{k,t}}$ es el flujo total que suministra el nudo origen k en el instante t
- $H_{k,t}$ es la cabeza en el nudo origen k en el instante t .
- γ corresponde al peso específico del fluido.
- $Q_{j,t}$ es el caudal que bombeado por el grupo de bombeo j en el instante t .
- $H_{j,t}$ es la cabeza aportada por el grupo de bombeo j para el instante t .
- $\eta_{j,t}$ corresponde al rendimiento del grupo de bombeo j en el instante t .

2.4.3 Índice de resiliencia de la red

El Índice de Resiliencia de la Red (NRI) formulado por Prasad & Park (2004) modifica el RI (Todini, 2000) para incluir una medida de redundancia en la red, incorporando la relación entre los diámetros de las tuberías adyacentes y el máximo de estos diámetros. Los bucles en una red se vuelven más fiables durante el aislamiento de un segmento cuando las tuberías conectadas a un nudo de consumo poseen menos variación entre sus diámetros. Este indicador de tipo determinista puede tomar valores entre cero y uno ($0 \leq NRI \leq 1$). Matemáticamente se expresa como:

$$NRI = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^{N_{inst}} UN_i \cdot D_{i,t} \cdot (H_{i,t} - H_{i,t}^{(req)})}{\sum_{k=1}^R \sum_{t=0}^{N_{inst}} D_{out_{k,t}} \cdot H_{k,t} + \sum_{j=1}^P \sum_{t=0}^{N_{inst}} \left(\frac{P_{j,t}}{\gamma} \right) - \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^{N_{inst}} D_{i,t} \cdot H_{i,t}^{(req)}} \quad (4)$$

De esta expresión, UN_i corresponde al coeficiente de uniformidad en los diámetros de las tuberías conectadas a los nudos de consumo, que viene dado por la siguiente expresión:

$$UN_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_{p,i}} d_j}{N_{p,i} \cdot \max\{d_j\}} \quad (5)$$

Donde:

- $N_{p,i}$ es el conjunto de tuberías conectadas al nudo de consumo i .
- d_j es el diámetro de la tubería j conectada al nudo de consumo i .

2.4.4 Índice de resiliencia modificada

El Índice de Resiliencia Modificado (MRI) presentado por Jayaram & Srinivasan (2008) define el excedente de energía suministrada en los nudos de consumo como un porcentaje de la energía requerida. Este indicador se aplica de mejor manera en SDA que presentan múltiples reservorios o embalses. Este indicador de tipo determinista puede tomar valores superiores a cero ($0 \leq \text{MRI}$). Matemáticamente se expresa como:

$$\text{MRI} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^{N_{inst}} D_{i,t} \cdot (H_{i,t} - H_{i,t}^{(req)})}{\sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^{N_{inst}} D_{i,t} \cdot H_{i,t}^{(req)}} \quad (6)$$

Un mayor valor del MRI indica una mayor cantidad de energía excedente en los nudos de consumo y, por lo tanto, una mayor capacidad de recuperación del SDA.

2.4.5 Entropía del flujo sensible al diámetro

La Entropía del Flujo Sensible al Diámetro (DSFE) formulada por Liu et al. (2014) propone la variación del diámetro como parámetro que posee un impacto significativo en la entropía (Tanyimboh & Templeman, 1993) de la red. Por lo cual, incorporan la velocidad como un parámetro, en lugar del diámetro, ya que la velocidad como propiedad hidráulica, puede reflejar los cambios de diámetro en las tuberías conectadas al nudo de consumo.

Basada en la relación inversa entre el diámetro y la velocidad del fluido en la tubería, cabe señalar que una tubería con un diámetro menor posee una velocidad más alta, dando como resultado un valor de entropía menor. Un mayor diámetro de la tubería es beneficioso en términos de fiabilidad, por lo tanto, aumentar el diámetro de la tubería mejora la capacidad del SDA para hacer frente a interrupciones y aumentos anormales de la demanda. Este indicador de tipo probabilístico puede tomar valores superiores a cero ($0 \leq \text{DSFE}$). Matemáticamente se expresa como:

$$\text{DSFE} = - \sum_{k \in IN} \frac{D_{out_k}}{T} \cdot \ln \left(\frac{D_{out_k}}{T} \right) - \sum_{i=1}^N \frac{T_i}{T} \cdot \left[\frac{D_i}{T_i} \cdot \ln \left(\frac{D_i}{T_i} \right) + \sum_{i \in ND_j} \frac{C}{V_{ij}} \cdot \frac{q_{ij}}{T_i} \cdot \ln \left(\frac{q_{ij}}{T_i} \right) \right] \quad (7)$$

Donde:

- C es una constante de velocidad arbitraria, que se utiliza para ponderar la entropía del flujo de las tuberías conectadas al nudo de consumo y cuantificar el impacto del diámetro sobre este. Como la entropía del flujo responde a una medida adimensional, se introduce este parámetro para ponderar dicha ecuación. Generalmente se suele utilizar el valor de 1 m/s.
- V_{ij} representa la velocidad del fluido saliente del nudo de consumo i a través de la tubería j .

2.4.6 Índice de potencia disponible

El Índice de Potencia Disponible (API) formulada por Liu et al. (2016) se basa en el principio de conservación de la energía y se expresa como la energía disponible en un SDA. De la misma manera, este índice expresa explícitamente la importancia de los tanques o depósitos, puesto que estos no solo permiten equilibrar la diferencia del flujo entre los periodos

pico, sino que además son capaces de almacenar energía durante el funcionamiento normal de la red y transferirlo en situaciones donde se altera en su funcionamiento. Este indicador de tipo determinista puede tomar valores entre cero y uno ($0 \leq API \leq 1$). Matemáticamente se expresa como:

$$API = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{t=0}^{N_{inst}} D_{i,t} \cdot H_{i,t}}{\sum_{k=1}^r \sum_{t=0}^{N_{inst}} D_{out_{k,t}} \cdot H_{k,t} + \sum_{j=1}^p \sum_{t=0}^{N_{inst}} \left(\frac{P_{j,t}}{\gamma} \right)} \quad (8)$$

2.4.7 Índice de resiliencia hidráulica de tuberías

El Índice de Resiliencia Hidráulica de Tuberías (PHRI) desarrollado por Liu et al. (2016) utiliza un nuevo método en términos del gradiente hidráulico a lo largo de las tuberías. Este indicador relaciona la diferencia de energía que existe entre ambos extremos de una tubería y la longitud de esta. Cuando el fluido circula a través de la tubería, la línea del gradiente hidráulico disminuye debido a la pérdida por fricción. Si las tuberías que se encuentran en tramos superiores disipan menos energía, aquellas tuberías posteriores obtendrán una mayor carga energética. Este indicador de tipo determinista puede tomar valores entre cero y uno ($0 \leq PHRI \leq 1$). Matemáticamente se expresa como:

$$PHRI = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{t=0}^{N_{inst}} S_{j,t}}{\sum_{j=1}^n \sum_{t=0}^{N_{inst}} (S_{j,t} + A_{j,t})} \quad (9)$$

Las funciones de área $S_{j,t}$, $S_{j,t} + A_{j,t}$ y aquella que expresa la longitud de proyección de la tubería j ($L_{pro,j}$) se obtienen de la siguiente manera:

$$S_{j,t} = \frac{1}{2} (H_{ds,j,t} - H_{j,t}^{(req)}) \cdot L_{pro,j} \quad (10)$$

$$S_{j,t} + A_{j,t} = \frac{1}{2} (H_{us,j,t} - H_{j,t}^{(req)}) \cdot L_{pro,j} \quad (11)$$

$$L_{pro,j} = \sqrt{L_j^2 - (Z_{us,j} - Z_{ds,j})^2} \quad (12)$$

Donde:

- $H_{ds,j,t}$ es la cabeza del nudo ubicado en el extremo aguas debajo de la tubería j en el instante t .
- $H_{j,t}^{(req)}$ representa la cabeza mínima requerida en el nudo extremo de la tubería j para el instante t .
- $H_{us,j,t}$ es la cabeza del nudo ubicado en el extremo aguas arriba de la tubería j en el instante t .
- L_j corresponde a la longitud de la tubería j .
- $Z_{us,j}$ es la cota del nudo ubicado en el extremo aguas arriba de la tubería j .
- $Z_{ds,j}$ es la cabeza del nudo ubicado en el extremo aguas debajo de la tubería j en el instante t .

2.4.8 Índice de resiliencia modificado centralizado

El Índice de Resiliencia Modificado Centralizado (CMRI) presentado por Paez (2019) modifica el MRI (Jayaram & Srinivasan, 2008) con el objetivo de permitir la comparación de los valores entre diferentes tipologías de SDA. Esto se identificó al comparar los resultados iniciales del MRI obtenidos a partir de SDA de ciudades a diferentes elevaciones, donde se obtuvieron resultados considerablemente mayores en aquellos SDA de ciudades en elevaciones bajas, incluso cuando presentaban un rendimiento inferior en términos de presiones. Este indicador de tipo determinista puede tomar valores superiores a cero ($0 \leq \text{MRI}$). Matemáticamente se expresa como:

$$\text{CMRI} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{t=0}^{N_{inst}} D_{i,t} \cdot p_{i,t}}{\sum_{i=1}^n \sum_{t=0}^{N_{inst}} D_{i,t} \cdot p_{min,t}} - 1 \quad (13)$$

Donde:

- $p_{i,t}$ corresponde a la presión del nudo de consumo i en el instante t .
- $p_{min,t}$ representa la presión mínima requerida en el nudo de consumo i para el instante t .

2.4.9 Estimador de confiabilidad mecánica

El Estimador de Confiabilidad Mecánica (MRE) desarrollado por Paez & Fillion (2019) se basa en los estudios de Fujiwara & Tung (1991) donde definen la confiabilidad mecánica como aquel valor esperado de la relación entre el fluido total suministro y el fluido total demandado para todas aquellas posibles combinaciones de escenarios de falla de tuberías.

La tolerancia, también llamada confiabilidad de primer grado formulada por Gheisi & Naser (2015), explica que la probabilidad de que se produzca más de un escenario de falla de tubería de forma simultánea es considerablemente reducida, por lo cual se representa el valor esperado de la relación entre la oferta y la demanda en escenarios de falla mecánica de tuberías cuando al menos un componente ha fallado.

A partir de ello, se presentó un estimador del valor esperado de la relación oferta y demanda total de la red considerando escenarios de fallas mecánicas. Este indicador de tipo probabilístico puede tomar valores entre cero y uno ($0 \leq \text{MRE} \leq 1$). Matemáticamente se expresa como:

$$\text{MRE} = \prod_{m \in P} A_m \cdot \left[1 + \sum_{m \in P} \left(\frac{1 - A_m}{A_m} \right) \left(\frac{T^{(req)} - q_m}{T^{(req)}} \right) \right] \quad (14)$$

De esta expresión, A_m expresa la probabilidad de que la tubería m no se encuentre disponible, que viene dado por la siguiente expresión:

$$A_m = \frac{0.21218 D_m^{1.462131}}{0.00074 D_m^{0.285} + 0.21218 D_m^{1.462131}} \quad (15)$$

Donde:

- P corresponde al conjunto de tuberías.
- D_m corresponde al diámetro de la tubería m expresada en pulgadas.
- $T^{(req)}$ es el flujo total requerido.
- q_m corresponde al flujo que la tubería m transporta en condiciones normales de funcionamiento.

En síntesis, dentro de la literatura científica es posible encontrar una docena de medidas sustitutivas para evaluar la resiliencia de los SDA, donde algunas de estas medidas requieren un enorme esfuerzo computacional. Con los antecedentes expuestos, para este proyecto de estudio se seleccionaron los indicadores más citados y referenciados en la literatura. La selección de estos determinados indicadores responde al objetivo de cubrir un mayor abanico de formas de representar la resiliencia de un SDA. Cabe destacar que estos índices de resiliencia pueden ser aplicados a todo tipo de redes de abastecimiento, ya sean ramificadas o malladas.

2.5 EL SOFTWARE EPANET

EPANET (Rossman, 2000) es un software de libre distribución, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), que realiza simulaciones del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en SDA a presión. Este programa permite seguir la evolución del flujo del agua en las conducciones, de la presión en los nudos, del nivel de agua en los depósitos y de la concentración de cualquier sustancia a través del sistema durante un periodo de simulación prolongado. Además de las concentraciones, permite también determinar los tiempos de permanencia del agua en la red y su procedencia desde los diferentes puntos de alimentación. Dentro de los elementos que puede simular el programa se encuentran tuberías, nudos, depósitos, reservorios, válvulas y bombas.

Este programa proporciona un entorno de trabajo simplificado para la edición de datos de entrada a la red, la realización de simulaciones hidráulicas y de calidad de agua, y la visualización de los resultados a través de una amplia gama de formatos. Entre estos se incluyen mapas de la red codificados, tablas numéricas, graficas de evolución y mapas de isolíneas. La versión original del software fue desarrollada en inglés y ha sido traducida para países de habla hispana donde la versión más difundida es la desarrollada por la Universidad Politécnica de Valencia (UPV).

Hoy en día, los ingenieros y consultores utilizan EPANET para modernizar la infraestructura existente, diseñar y dimensionar nueva estructura de agua, investigar problemas de calidad del agua y prepararse para emergencias, reducir el uso de la energía y optimizar las operaciones de tanques y bombas. EPANET además se puede utilizar para modelar amenazas de contaminación y evaluar la resiliencia ante amenazas de seguridad o desastres naturales.

2.5.1 El Toolkit de EPANET

EPANET además de ser un programa gratuito, permite el acceso al código fuente el cual puede ser modificado por el usuario para adaptarlo a requerimientos específicos. El módulo de herramientas, también llamado Toolkit, permite conectar la librería de cálculo de EPANET con cualquier otra aplicación externa, abriendo de esta forma un campo de posibilidades para cualquier técnico o investigador que pretenda ir más allá de lo que la interfaz básica la aplicación ofrece. En otras palabras, es una librería de enlace dinámico con una serie de



funciones agrupadas por tareas accesibles al usuario desde casi cualquier entorno de programación.

La librería de cálculo de EPANET cuenta con un elevado número de funciones que permiten recuperar y modificar determinados parámetros del modelo de la red, antes y después de la realización de una simulación hidráulica, permitiendo además controlar este proceso paso a paso. El Toolkit de EPANET se puede integrar a cualquier entorno de programación nativo o en las propias herramientas de programación que ofrecen muchos paquetes de software, ya sean de pago como Excel, AutoCAD, ArcGIS, etc. o bien de libre distribución como lo son OpenOffice, gvGIS, QGIS, etc.

A partir de la creación y desarrollo tanto del software como de la librería se presentó un manual para el usuario de EPANET desarrollado por Rossman (2000) el cual incorpora la utilización del software bajo los diversos entornos de programación más comunes el cual también es de libre acceso.

Durante el año 2019 fue desarrollada la versión de EPANET 2.2.0 la cual contiene una librería de código abierto mucho más potente en cuanto al número de funciones y operaciones que es posible realizar en comparación con sus versiones anteriores. Esta nueva librería cuenta con funciones como la modificación de la estructura de la red, la cual anteriormente no se encontraba incorporada. Este cambio es un avance significativo hacia un gran número de posibilidades a realizar, abriendo de esta manera un mayor campo de investigación y de análisis de los SDA. No obstante, esta nueva versión de EPANET y su librería aún se encuentra en proceso de desarrollo y modificación del código fuente, el cual es posible encontrar en el repositorio gestionado por la asociación *Open Water Analytics* desde el portal de software libre *GitHub*.



CAPÍTULO III:

METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE UN SDA MEDIANTE INDICADORES DE RESILIENCIA

3.1 MODELO INFORMÁTICO PARA LA EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA

Como parte de los objetivos de este TFM se plantea la evaluación y el análisis de la resiliencia en redes de abastecimiento, confeccionándose un modelo informático que integra indicadores de estimación de la resiliencia como el parámetro principal de estudio. Esta herramienta desarrollada basa su estructura en los modelos de comportamiento, los cuales son utilizados con el objetivo de describir el funcionamiento de un sistema.

En cuanto a los modelos de comportamiento existentes dentro de la literatura se distinguen dos de estos: el modelo de flujo de datos, los cuales simulan el procesamiento de los datos en el sistema, y el modelo de máquinas de estado, que simulan cómo el sistema reacciona a determinados eventos. Estos modelos utilizados en diversas plataformas informáticas pueden usarse de forma separada o conjuntamente, dependiendo de la tipología de sistema que se

esté desarrollando. Para el desarrollo de este proyecto de estudio se utilizaron ambos tipos de modelos dado que se evaluará la resiliencia tanto en condiciones normales de funcionamiento como ante eventos disruptivos que alteren el funcionamiento de la red.

3.1.1 Modelo matemático de una red

Un modelo matemático de una red de abastecimiento de agua es una herramienta que permite simular de manera teórica el funcionamiento del sistema y establecer diversas hipótesis en cuanto a su funcionamiento. El principal objetivo de éste es reproducir de manera simplificada y con la mayor exactitud dentro de lo posible el comportamiento hidráulico real de un SDA. Las aplicaciones prácticas de disponer de un modelo matemático de una red de abastecimiento son múltiples, ya que permite realizar estudios operacionales de la infraestructura de distribución, generar recomendaciones pertinentes para la optimización del sistema, detectar zonas problemáticas dentro de la red, realizar estudios de vulnerabilidad, planificar ampliaciones futuras, facilitar la toma de decisiones para un adecuado control tanto de los caudales como de la calidad del agua, entre otras. Los modelos matemáticos de los SDA permiten realizar una evaluación completa del comportamiento de la red, además de ser una herramienta imprescindible para los técnicos respecto a la operación y administración de la red de agua.

Para estudiar la resiliencia de sistema de abastecimiento de agua, como elemento fundamental se requiere de un modelo matemático inicial de la red. En la actualidad, existen diversos tipos de herramientas informáticas que permiten representar una red de abastecimiento. Para este caso en particular se utilizó el software EPANET en su versión 2.2.0, el cual se ha consolidado durante las últimas décadas como uno de los programas con mayor aceptación en cuanto a simulación de redes de agua. EPANET modela un SDA como un conjunto de líneas conectadas a través de nudos. Las líneas representan las tuberías, bombas o válvulas, mientras que los nudos representan nudos de conexión y demanda, depósitos o embalses.

3.1.2 Conexión de la API de EPANET con el entorno de programación

La librería dinámica de EPANET 2.2.0 también llamada API (Application Programming Interface) fue lanzada en noviembre de 2019 como una nueva versión de la 2.00.12, con fecha de 2008. Esta nueva versión posee módulos de código separados para el procesamiento de datos de entrada, el análisis hidráulico, el análisis de calidad del agua y la resolución del sistema de ecuaciones lineales, incluyendo actualizaciones importantes para los motores hidráulicos y de calidad de agua. Consta de 125 funciones y 212 variables que se utilizan con las funciones como parámetros de entrada. Puede ser incorporada en entornos de programación de todo tipo que permita la llamada a las funciones incorporadas en la DLL de Windows.

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó el lenguaje de programación Visual Basic .NET trabajado sobre el entorno de Microsoft Visual Studio. Para poder trabajar con la librería de EPANET se debe transformar el fichero epanet2.bas a un nuevo fichero de módulo (epanet2.vb) entendible para el nuevo entorno de programación. De la misma manera, se debe modificar la declaración de los tipos de datos de variables, parámetros de entrada y funciones para adaptarla al lenguaje Visual Basic .NET ya que la nueva versión de esta librería dinámica ha sido escrita en el lenguaje de programación C#.

Una vez creado el nuevo proyecto dentro de Visual Studio y seleccionado el lenguaje de programación, se crea la interfaz de usuario de Windows (Aplicación de Windows Forms) y se añade el módulo base (Epanet2.vb) donde se declaran las variables globales y funciones que interactúan con la librería de EPANET (epanet2.dll). Se debe agregar este módulo dentro de la carpeta “Debug” que se encuentra alojada dentro de la carpeta “bin” para trabajar directamente con la librería como se observa en la Figura 3.

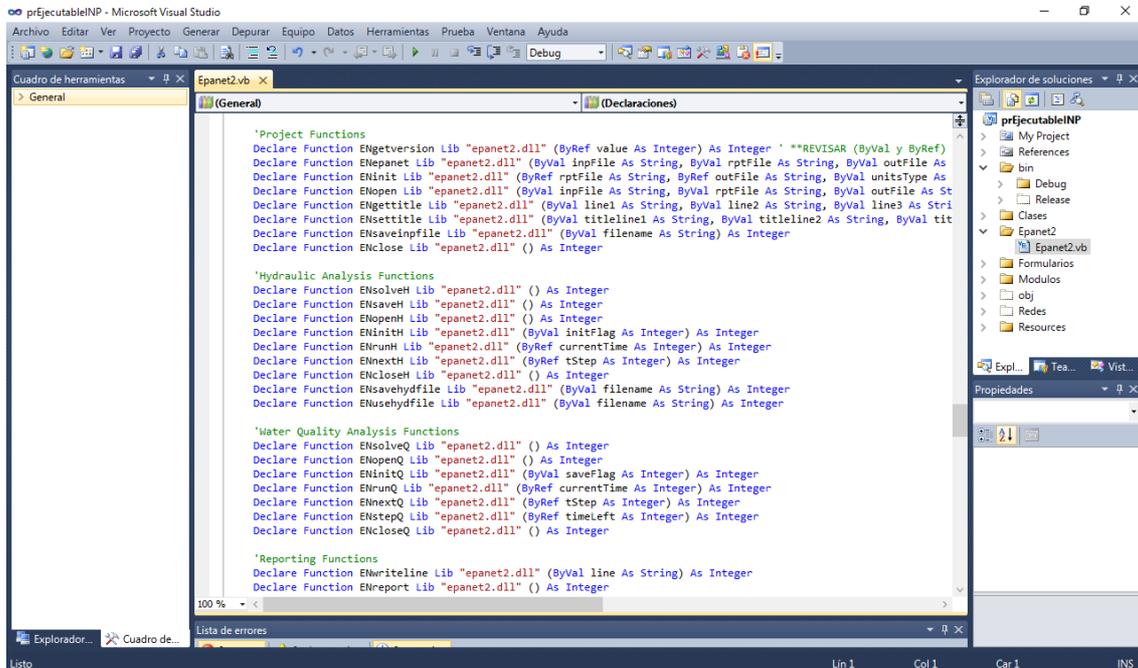


Figura 3. Conexión de la API de EPANET al entorno de programación Visual Studio.

3.1.3 Estructura del código

Para analizar el modelo matemático de la red habitualmente se utiliza la interfaz gráfica que proporciona EPANET y de esta manera se comprueba el funcionamiento de la red a través de las gráficas y tablas de información que son posibles de exportar a través de este programa. Sin embargo, para este trabajo se utilizó de la librería dinámica de EPANET para analizar el comportamiento de la red a través de la programación, trasladando el código de cálculo y simulación de EPANET el cual permite realizar un análisis más profundo y detallado a la hora de ejecutar operaciones y modificar la estructura del modelo matemático de una red.

Para la construcción del código que permite estudiar las redes de distribución de agua se utilizó la Programación Orientada a Objetos (POO) para obtener resultados. A través de los objetos se manipulan los datos de entrada para obtener datos de salida específicos, donde cada objeto pertenece a una clase de elemento determinado dentro de la estructura de un SDA como lo son las tuberías, bombas, válvulas, nudos de demanda, depósitos y embalses. Así es como se desarrolló una biblioteca o librería que contiene estos objetos además de sus propiedades o atributos que se utilizan para calcular la resiliencia de la red.

Como primer paso se obtienen los datos iniciales y estructura de la red además de los parámetros de cálculo hidráulico a través de la lectura del archivo (.inp) que contiene el modelo matemático de la red. Toda esta información es almacenada para ser utilizada al momento de realizar el cálculo hidráulico de la red. Una vez el modelo básico de lectura se encuentra listo,

se procede a la configuración del simulador hidráulico del modelo, para ello se establece el tipo de simulación ya sea estático o dinámico. Se inicializan las variables que serán obtenidas a través del cálculo hidráulico de la red y que permiten almacenar los resultados.

Posteriormente se programan los indicadores de resiliencia obtenidos a través de la bibliografía. Para ello, se configuran cada uno de los algoritmos de cálculo de los indicadores de resiliencia para un estado tanto estático como dinámico, el cual permite el análisis de la resiliencia de la red para cada instante de tiempo. Por último, se procedió a configurar el algoritmo de cálculo de los índices de resiliencia globales de la red, los cuales corresponden al valor representativo de cada uno de los índices de resiliencia para la red estudiada, los que sirven como parámetro de comparación para analizar la evolución de la resiliencia para cada instante de tiempo, además de brindar una idea general del funcionamiento de la red tanto condiciones normales como ante eventos disruptivos.

Esquemáticamente, la estructura de los procedimientos que se llevan a cabo a través de código de programación para este estudio se puede observar en la Figura 4.

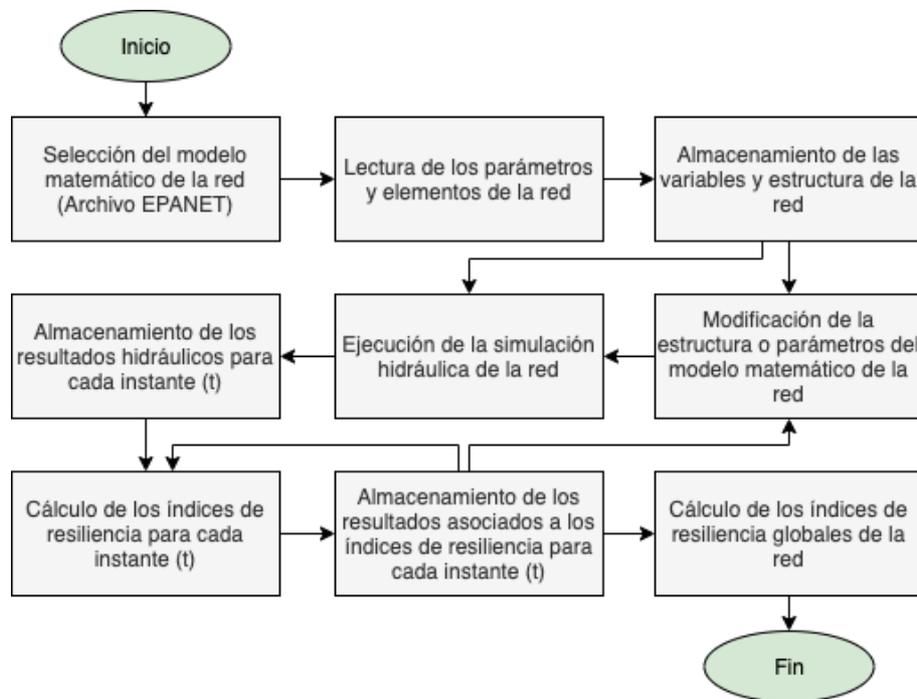


Figura 4. Esquema de flujo de los procedimientos del código.

3.1.4 Interfaz gráfica

Como parte de este trabajo investigativo e incluido dentro de los objetivos planteados, una vez la estructura del código con los algoritmos para evaluar la resiliencia de las redes de distribución de agua se encuentran preparados, se procedió a la confección de una aplicación informática de tipo académica.

Esta aplicación, además de contener el código desarrollado incorpora una interfaz gráfica que permita exponer los resultados obtenidos a través de la ejecución de los algoritmos de cálculo de los diferentes indicadores de resiliencia. Esta aplicación o ejecutable cumple la función de ser una ventana visual tras el código elaborado, permitiendo simplificar la obtención de los resultados.

Dentro de las funciones que posee esta aplicación se pueden destacar:

- Selección del modelo matemático de la red a través de un fichero EPANET (.inp).
- Resumen de la estructura y configuración inicial de la red.
- Mostrar en pantalla los resultados del cálculo de los indicadores de resiliencia para cada uno de los instantes de tiempo simulados.
- Exportar los resultados del cálculo de los indicadores de resiliencia a través de un fichero de texto (.txt).
- Mostrar en pantalla el cálculo de los indicadores de resiliencia globales de la red en conjunto con la información asociada a cada uno de ellos.
- Exportar los modelos matemáticos modificados compatibles con EPANET a través de un nuevo archivo en formato (.inp).
- Realizar barridos topológicos para evaluar la correcta estructura y funcionamiento de la red seleccionada mediante la incorporación de grafos en su análisis, cuyos resultados son expuestos en pantalla.
- Obtención de la máxima demanda global de la red y la máxima demanda extraíble de cada uno de los nudos que componen la red, cuyos resultados son presentados en pantalla.

De manera representativa en la Figura 5 se muestra la interfaz gráfica de la aplicación desarrollada para este TFM.

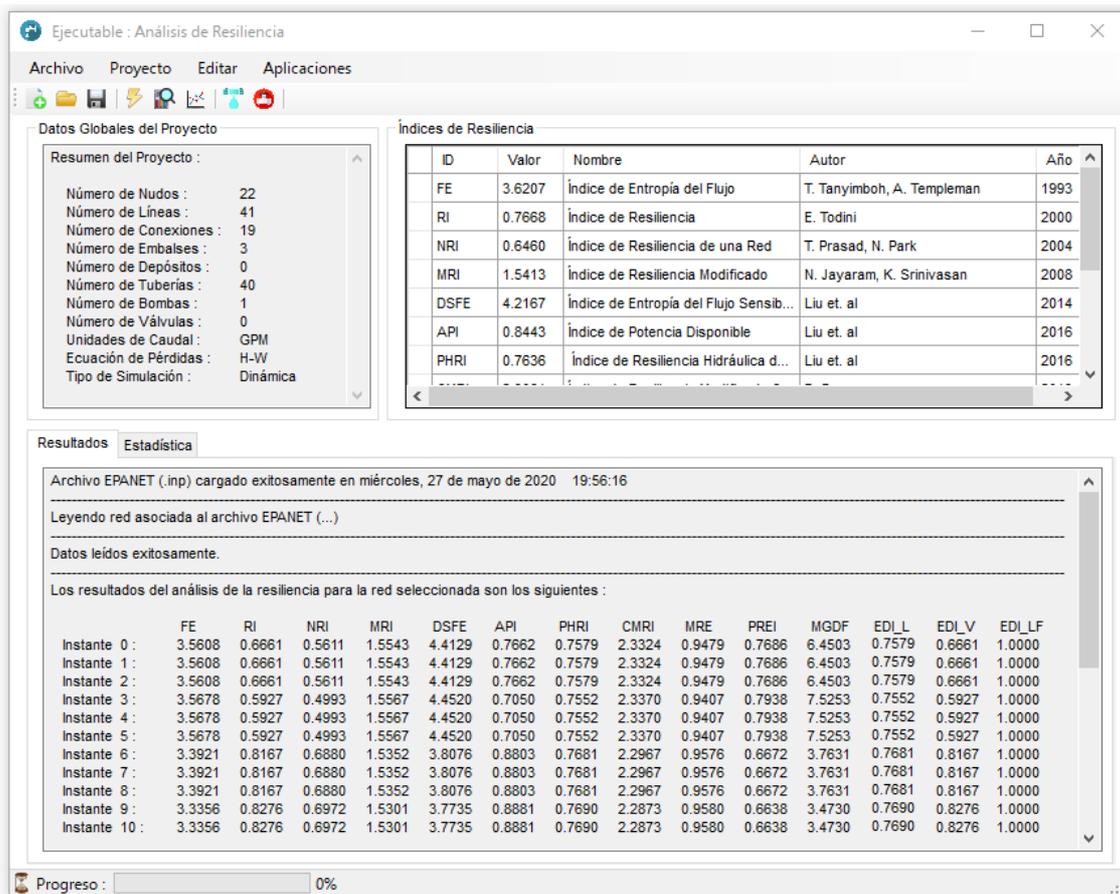


Figura 5. Ejecutable desarrollado para el cálculo de la resiliencia de un SDA.

3.2 CASOS DE APLICACIÓN

Como parte de los objetivos de estudio de este TFM, el cual se basa en el análisis y evaluación de la resiliencia de redes de distribución de agua, se presentan a manera de resumen las 10 redes estudio de carácter académico investigativo, obtenidas a través de diferentes portales ligados a la investigación de SDA, las cuales se han sido utilizadas para probar el modelo informático desarrollado y obtener mediante cálculo la resiliencia de las redes.

3.2.1 Fosspoly1

La red Fosspoly1 (ver Figura 6) es el modelo de una red real ubicada en Italia la cual fue presentada por primera vez por Bragalli et al. (2012). Esta red se encuentra compuesta por 1 embalse de cabecera, 36 nudos de consumo y 58 tuberías. La demanda nodal de la red es de $145.86 \text{ m}^3/\text{h}$ y la longitud total de las tuberías de la red es de 8.40 km con diámetros entre 16 y 229.2 milímetros.

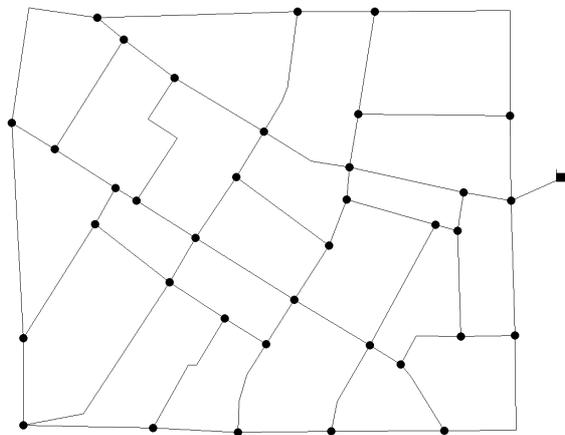


Figura 6. Modelo matemático de la red Fosspoly1.

3.2.2 Pescara

La red Pescara (ver Figura 7) es una versión reducida de una red real de tamaño mediano ubicada en Italia. Esta se compone por 3 embalses de cabecera elevados, 68 nudos de consumo y 99 tuberías. La demanda nodal promedio es de $1794.10 \text{ m}^3/\text{h}$ y la longitud total de las tuberías de la red es de 48.60 km con diámetros entre 100 y 400 milímetros. Esta red fue presentada por primera vez por Bragalli et al. (2006).

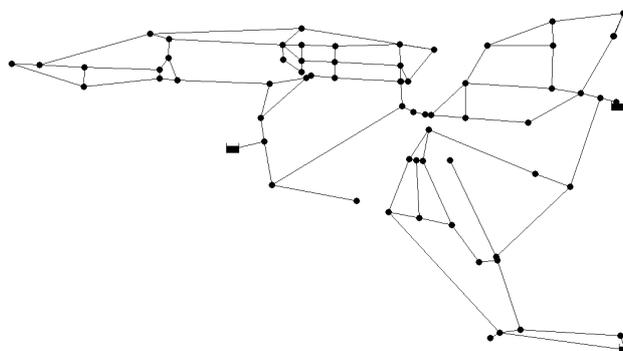


Figura 7. Modelo matemático de la red Pescara.

3.2.3 Modena

La red Modena (ver Figura 8) corresponde al modelo de una red real ubicada en Italia. Esta red se compone por 4 embalses de cabecera, 268 nudos de consumo y 317 tuberías. La demanda nodal promedio es de $1465.03 \text{ m}^3/\text{h}$ y la longitud total de las tuberías de la red es de 71.80 km con diámetros entre 100 y 400 milímetros. Esta red fue presentada por primera vez por Bragalli et al. (2012).

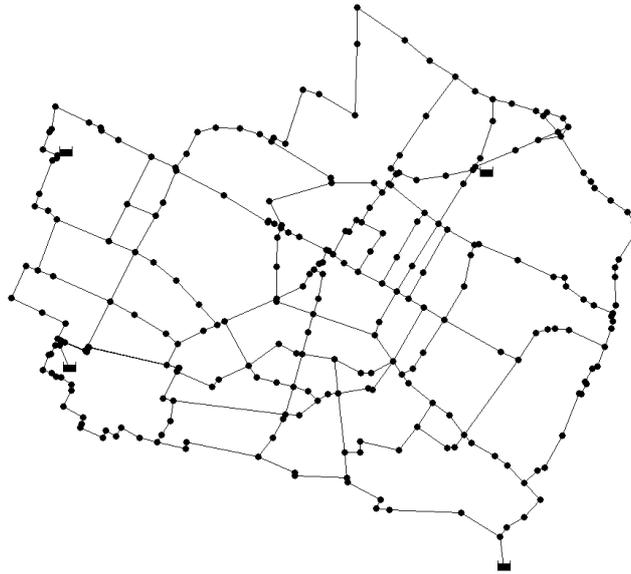


Figura 8. Modelo matemático de la red Modena.

3.2.4 KL Network

La red KL (ver Figura 9) corresponde a una versión modificada de la red presentada por primera vez por Zhuang et al. (2013), excluyendo el sistema de emergencia de incendios. Esta red se estructura mediante 1 embalse de cabecera, 935 nudos de consumo y 1274 tuberías. La demanda nodal promedio es de $1454.84 \text{ m}^3/\text{h}$ y la longitud total de las tuberías de la red es de 252.50 km con diámetros entre 6 y 20 pulgadas.

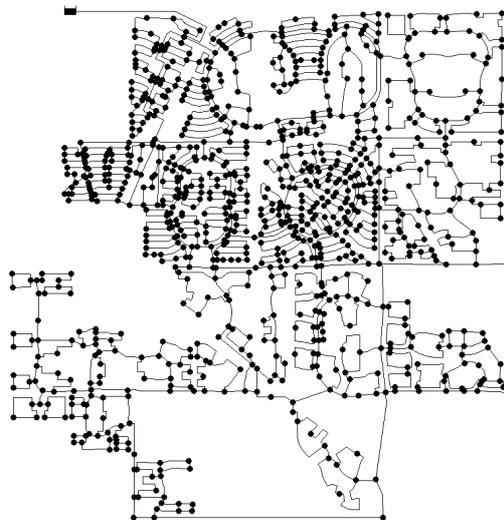


Figura 9. Modelo matemático de la red KL Network.

3.2.5 Kentucky 2

La red Kentucky 2 (ver Figura 10) es un fragmento de la red ubicada en la ciudad de Kentucky en Estados Unidos. Esta red se compone mediante 1 embalse de cabecera, 3 depósitos elevados, 1 bomba, 811 nudos de consumo y 1124 tuberías. La demanda nodal promedio es de $395.92 \text{ m}^3/\text{h}$ y la longitud total de las tuberías de la red es de 152.25 km con diámetros entre 2 y 12 pulgadas. Las pérdidas de agua de la red se estiman en un 9% del agua total producida. La red Kentucky 2 fue creada originalmente por Jolly et al. (2014). Este modelo de red fue actualizado por Schal (2013), y posteriormente por Hernández et al. (2016).



Figura 10. Modelo matemático de la red Kentucky 2.

3.2.6 Balerma

La red Balerma (ver Figura 11) es una adaptación de una red de riego existente en el distrito de Sol-Poniente en la ciudad de Almería en España. Está compuesta por 4 embalses de cabecera, 443 nudos de consumo y 454 tuberías. La demanda nodal promedio es de $4773.69 \text{ m}^3/\text{h}$ y la longitud total de las tuberías de la red es de 100.27 km con diámetros entre 80 y 550 milímetros. La red fue presentada y optimizada por primera por Reca & Martínez (2006) mediante la utilización de algoritmos genéticos.



Figura 11. Modelo matemático de la red Balerma.

3.2.7 Rural Network

La red Rural (ver Figura 12) se adaptó a partir de una red de riego real la cual fue presentada por primera vez por Marchi et al. (2014). Esta red se estructura mediante 2 embalses de cabecera, 379 nudos de consumo y 476 tuberías. La demanda nodal promedio es de $418.65 \text{ m}^3/\text{h}$ y la longitud total de las tuberías de la red es de 1288.42 km con diámetros entre 450 y 1000 milímetros.

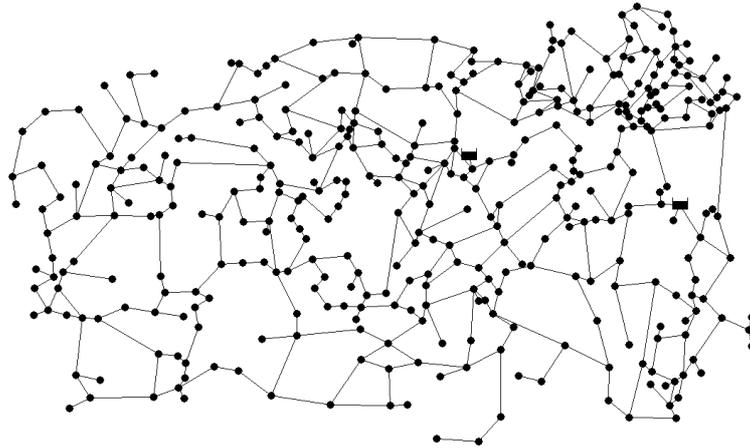


Figura 12. Modelo matemático de la red Rural Network.

3.2.8 Kentucky 4

La red Kentucky 4 (ver Figura 13) es un fragmento de la red ubicada en la ciudad de Kentucky en Estados Unidos. Esta compuesta por 1 embalse de cabecera, 4 depósitos elevados, 2 bombas, 959 nudos de consumo y 1156 tuberías. La demanda nodal promedio es de $286.05 \text{ m}^3/\text{h}$ y la longitud total de las tuberías de la red es de 260.25 km con diámetros entre 3 y 16 pulgadas. Las pérdidas de agua de la red se estiman en un 12% del agua total producida. La red Kentucky 4 fue creada originalmente por Jolly et al. (2014). Este modelo de red fue actualizado por Schal (2013), y posteriormente por Hernández et al. (2016).



Figura 13. Modelo matemático de la red Kentucky 4.

3.2.9 Wolf-Cordera Ranch

La red Wolf-Cordera Ranch (ver Figura 14) corresponde a una red real ubicada en una comunidad de Colorado Spring, Estados Unidos. Esta red forma parte de la base de datos de los modelos de referencia de EPANET del centro de Exeter para Sistemas de Agua ECWS (2020). Esta red se estructura mediante 128 embalses de cabecera, 6 bombas, 1906 nudos de consumo y 2109 tuberías y 128 válvulas. La demanda nodal promedio es de 2262.71 m³/h y la longitud total de las tuberías de la red es de 118.14 km con diámetros entre 6 y 24 pulgadas.



Figura 14. Modelo matemático de la red Wolf-Cordera Ranch.

3.2.10 ZJ Network

La red ZJ (ver Figura 15) corresponde a una red sintética que forma parte de la base de datos del comité ASCE para el desarrollo y prueba de algoritmos para el diseño, análisis y operaciones de redes. Esta red se compone por 1 embalse de cabecera, 113 nudos de consumo y 164 tuberías. La demanda nodal promedio es de 4001.08 m³/h y la longitud total de las tuberías de la red es de 126.44 km con diámetros a partir de los 600 milímetros.

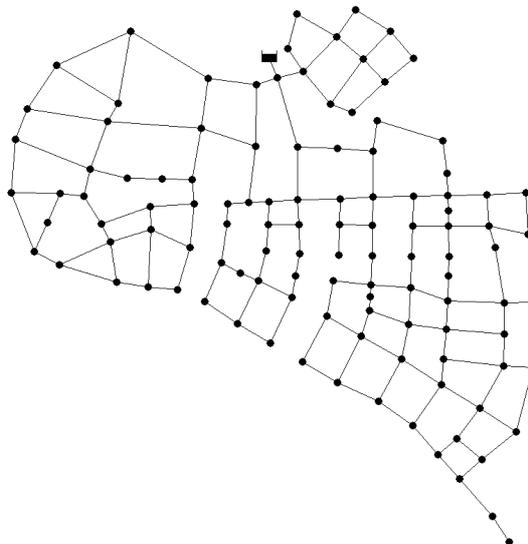


Figura 15. Modelo matemático de la red ZJ Network.

3.3 PRESENTACIÓN DE CASOS

Una vez ajustado el modelo informático desarrollado para este proyecto de estudio y realizadas las correspondientes simulaciones previas a través de modelos matemáticos de prueba, se procede a la aplicación de la herramienta computacional a los SDA previamente seleccionados.

Con el objetivo de simplificar la información de los datos utilizados, en la Tabla 3 se presenta un resumen con las características de cada uno de los modelos matemáticos de las redes de distribución de agua donde fueron aplicados los algoritmos de cálculo asociados a los diferentes indicadores de resiliencia.

Tabla 3. Resumen general de las redes de estudio.

ID Red	Estructura						Opc. Hidráulicas			
	Nro. Nudos de Consumo	Nro. Embalses	Nro. Depósitos	Nro. Tuberías	Nro. Bombas	Nro. Válvulas	Ec. de Pérdidas	Unid. de Presión	Unid. de Caudal	Tipo de Simulación
Fosspoly1	36	1	0	58	0	0	H-W	mca	LPS	Permanente
Pescara	68	3	0	99	0	0	H-W	mca	LPS	Permanente
Modena	268	4	0	317	0	0	H-W	mca	LPS	Permanente
KL Network	935	1	0	1274	0	0	H-W	psi	GPM	Permanente
Kentucky 2	811	1	3	1124	1	0	H-W	psi	GPM	Permanente
Balerna	443	4	0	454	0	0	D-W	mca	LPS	Permanente
Rural Network	379	2	0	476	0	0	D-W	mca	LPS	Permanente
Kentucky 4	959	1	4	1156	2	0	H-W	psi	GPM	Permanente
Wolf-Cordera	1906	128	0	2109	6	128	H-W	psi	GPM	Permanente
ZJ Network	113	1	0	164	0	0	H-W	mca	LPS	Permanente

Para cada una de las redes de abastecimiento seleccionadas se realiza de manera particular la ejecución del algoritmo de cálculo que incorpora el modelo informático. Cabe señalar, que el análisis de la resiliencia de las redes de agua para este caso de estudio se realiza bajo condiciones normales de operación y funcionamiento.

En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos de cada uno de los indicadores de resiliencia tras la aplicación de la herramienta informática a las redes de estudio.

Tabla 4. Resultantes de los indicadores de resiliencia para cada una de las redes de estudio.

ID Red	Presión Mínima	FE	RI	NRI	MRI	DSFE	API	PHRI	CMRI	MRE
Fosspoly1	20	3.6765	0.8804	0.5901	0.3872	4.4426	0.9635	0.9243	1.6269	0.9776
Pescara	20	3.9708	0.3186	0.2708	0.3345	4.4157	0.6510	0.8184	0.4467	0.9719
Modena	20	5.4098	0.2717	0.2555	0.0863	7.5650	0.8244	0.7845	0.2385	0.9787
KL Network	20	5.3088	0.6759	0.6596	0.0949	13.2203	0.9601	0.9970	1.8719	0.7676
Kentucky 2	20	9.0595	0.0455	0.0398	0.2630	36.0889	0.1861	0.9982	2.2962	0.6258
Balerna	20	5.9124	0.2920	0.2820	0.1634	6.7315	0.7459	1.2177	0.6284	0.9845
Rural Network	20	0.7276	0.9934	0.9920	0.2495	10.7365	0.9987	1.0176	1.6898	0.9672
Kentucky 4	20	4.9908	0.0089	0.0083	0.1760	34.7125	0.0567	1.0764	1.9181	0.5899
Wolf-Cordera	20	7.3260	0.9119	0.8300	0.0287	86.7374	0.9973	1.0232	3.8490	0.6686
ZJ Network	20	5.3254	0.0845	0.0845	0.1546	36.0773	0.4080	1.0725	0.2049	0.9455

A partir de los resultados obtenidos, se presenta de manera gráfica la resultante de cada uno de los indicadores de resiliencia incorporados en el algoritmo de cálculo para cada red de

distribución de agua simulada. De esta manera, en la Figura 16 se representan de forma conjunta aquellos indicadores que toman valores entre 0 y 1 dentro de los que se encuentran: Índice de Resiliencia (RI), Índice de Resiliencia de la Red (NRI), el Índice de Potencia Disponible (API) y el Estimador de Confiabilidad Mecánica (MRE).

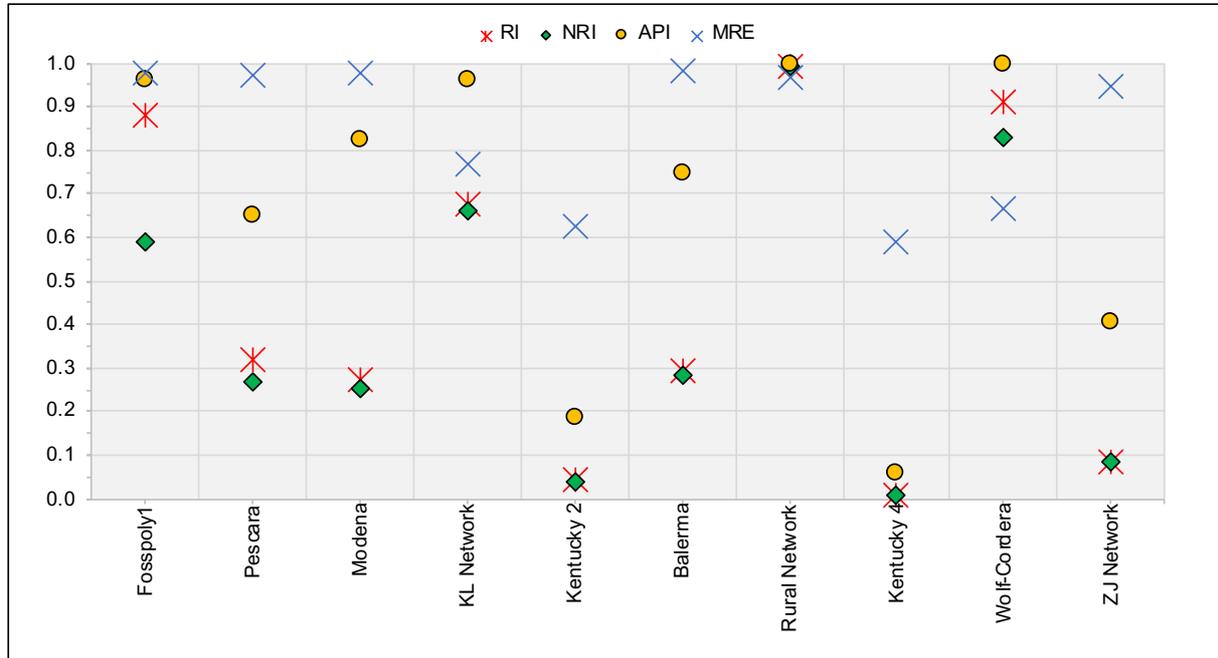


Figura 16. Diagrama de resultados de los índices de resiliencia RI, NRI, API y MRE para cada una de las redes de estudio.

Por otra parte, en la Figura 17 se representan de forma conjunta aquellos los indicadores que toman valores superiores a 0 dentro de los que se encuentran: Entropía del Flujo (FE), Entropía del Flujo Sensible al Diámetro (DSFE), Índice de Resiliencia modificado (MRI), Índice de Resiliencia Hidráulica de Tuberías (PHRI) y el Índice de Resiliencia Modificado Centralizado (CMRI).

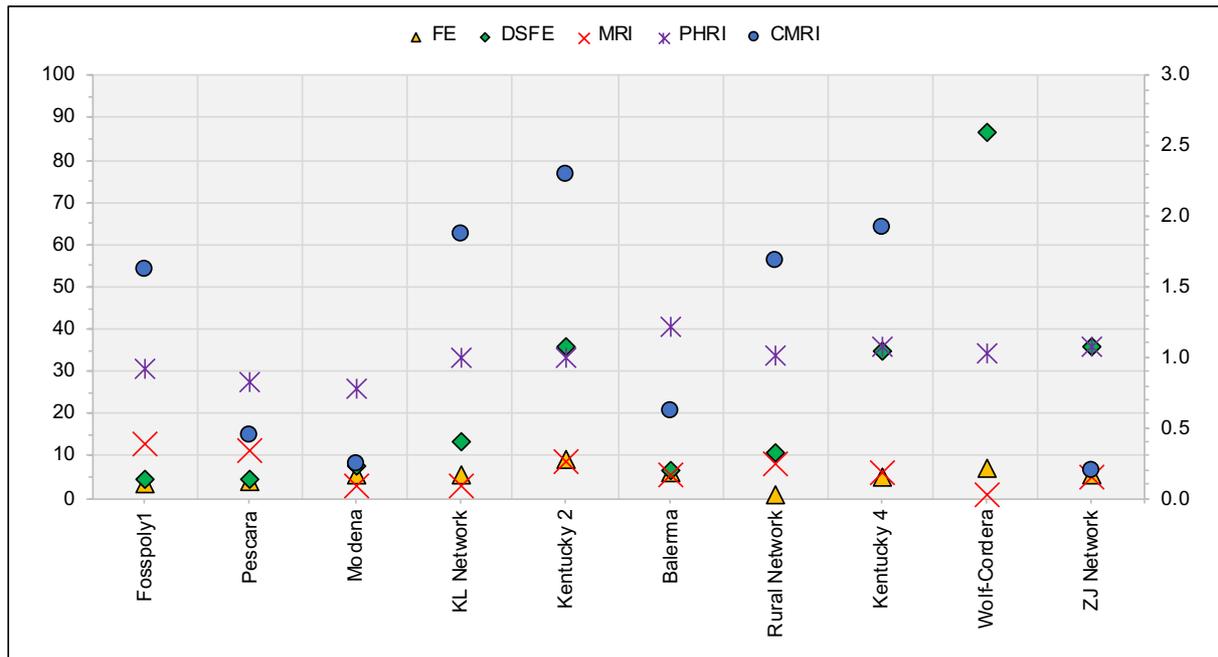


Figura 17. Diagrama de resultados de los índices de resiliencia FE, DSFE, MRI, PHRI y CMRI para cada una de las redes de estudio.

De acuerdo con el grupo de soluciones obtenidos, si se observan los resultados es posible comparar estas salidas y analizar la variabilidad que presentan para cada uno de los indicadores que incorpora el modelo informático como para las redes en conjunto. Esta variabilidad se da en gran medida debido a la propia estructura y composición de cada uno de los índices. Aunque, muchos de estos indicadores se asemejan y presentan parámetros de cálculo muy similares el uno del otro, estos apuntan a una medida concreta de evaluación de la resiliencia del sistema, lo que aporta una diversa gama de análisis incorporando distintos aspectos característicos de un abastecimiento de agua.

3.4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Las medidas de evaluación y análisis de resiliencia aplicadas a las redes de distribución de agua permiten dirigir a la gestión del abastecimiento hacia evaluaciones basadas en medidas sustitutivas lo más ajustadas a la realidad posible, llevando a cabo una estimación aproximada de la resiliencia orientada a la parte hidráulica del sistema.

Teniendo claro los criterios que incorporan cada uno de los índices de resiliencia aplicados, cabe destacar que estas medidas pueden ser consideradas como eficientes para la evaluación de la resiliencia de los abastecimientos de agua dado la simplicidad que presentan dentro de su estructura de cálculo. Estos algoritmos solo requieren la resolución de las ecuaciones de flujo en estado estacionario. Además, no incorporan la simulación de combinaciones bajo escenarios de fallo dentro de la red, siendo este tipo de indicadores aplicables a diversas tipologías y tamaños de redes de agua.

Por último, pese a que los casos de estudio simulados son de carácter estacionario, estos indicadores de resiliencia pueden ser aplicados mediante el modelo informático programado en redes de abastecimiento cuya configuración presente periodos de simulación extendidos. De lo anterior, es importante señalar que una de las principales aportaciones en este apartado



es la incorporación del algoritmo de cálculo global de cada uno de los indicadores de resiliencia para los SDA, esto quiere decir que además de integrar el cálculo de la resiliencia para cada uno de periodos de simulación, se dispone de un valor global para la red con el cual comparar aquellos resultados.

Se debe tener presente que este tipo de medidas sustitutivas además de evaluar la fiabilidad del funcionamiento de un abastecimiento, no deben representar una enorme carga computacional, sino más bien una solución eficiente en cuanto al cálculo informático requerido.

En conclusión, el objetivo principal de la aplicación de los indicadores de resiliencia dentro de este proyecto de estudio es introducir al análisis de la resiliencia enfocada a los SDA bajo parámetros de evaluación adimensionales que pueden ser encontrados dentro de la literatura científica y que han sido ocupados en diferentes disciplinas y procesos durante los últimos años.



CAPÍTULO IV: INDICADOR DE RESILIENCIA BASADO EN EFICIENCIA ENERGÉTICA

4.1 CONSUMO ENERGÉTICO EN EL CICLO URBANO DEL AGUA

Durante las últimas décadas, el interés entorno a la preocupación ambiental por el constante aumento en consumo energético a nivel global ha promovido diversos estudios e investigaciones ligadas a este campo, en los que se señala a la industria del agua como el consumidor de aproximadamente el 7% de la energía total producida a nivel mundial (Ferrer et al. 2016). Por este motivo, los análisis acerca del consumo energético en cada una de las etapas del ciclo urbano del agua han tomado cada vez mayor relevancia en la actualidad.

La dependencia existente en el binomio agua/energía ha supuesto diversos enfoques de investigación sobre la importancia que tiene el consumo energético en las distintas fases del ciclo del agua a nivel urbano. Dejando de lado los usos finales, el ciclo del agua en los centros urbanos se puede describir siguiendo el esquema de: captación y transporte, potabilización, distribución urbana, alcantarillado y depuración, vertido, reutilización y redistribución (Cabrera et al. 2010). Esta división, en conjunto con sus pequeñas variaciones, es la estructura comúnmente utilizada por las diversas agencias, explotadores y expertos en el tema cuando se pretende cuantificar el consumo energético en cada una de las fases del ciclo urbano del agua.

Los diferentes ratios obtenidos a través del análisis y evaluación de los SDA que han realizado algunos países para estimar su propio consumo energético en el ciclo urbano del agua, han concluido que existe una clara variabilidad en cuanto a los consumos energéticos dentro de las diferentes etapas que componen este ciclo. En diversas ocasiones, estas diferencias se encuentran ligadas a las propias exigencias o características establecidas por los entes administradores y legislativos que estipulan determinados parámetros, como por ejemplo, la calidad de agua entregada a los usuarios o el nivel de depuración de las aguas residuales, lo que dificulta comparar y establecer una relación entre distintos abastecimientos acerca del consumo energético requerido dentro del ciclo urbano del agua.

Tabla 5. Consumo energético de las diferentes etapas del ciclo urbano del agua (Iglesias-Castelló et al. 2018)

Etapa del Ciclo del Agua	Consumo Energético (kWh/m ³)		
	Mínimo	Máximo	Rango (%)
Transporte y distribución del agua	0.18	4.02	25% - 40%
Potabilización del agua para consumo	0.03	4.23	4% - 40%
Tratamiento y depuración para vertido	0.40	1.65	15% - 55%
Tratamiento y distribución de aguas reutilizadas	0.11	0.32	3% - 15%

No todas las etapas que componen este ciclo presentan el mismo nivel de consumo energético, bajo este contexto, la energía asociada al transporte y distribución del agua potabilizada puede llegar a suponer hasta el 40% del consumo energético del proceso completo tal como se muestra en la Tabla 5. Es así como, el apartado de transporte y distribución dentro del ciclo integral del agua es aquel que desencadena el foco de atención en el estudio y análisis energético de los SDA.

4.2 BALANCE ENERGÉTICO ASOCIADO AL TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE AGUA

El objetivo fundamental de realizar un balance energético orientado al proceso de transporte y distribución de agua consiste en analizar toda la energía que se utiliza para llevar el agua desde la cabecera de origen hasta los usuarios finales, identificando de esta manera las dos grandes instancias energéticas a lo largo de este proceso como lo son la energía suministrada y la energía consumida, tal como se muestra en la Figura 18.

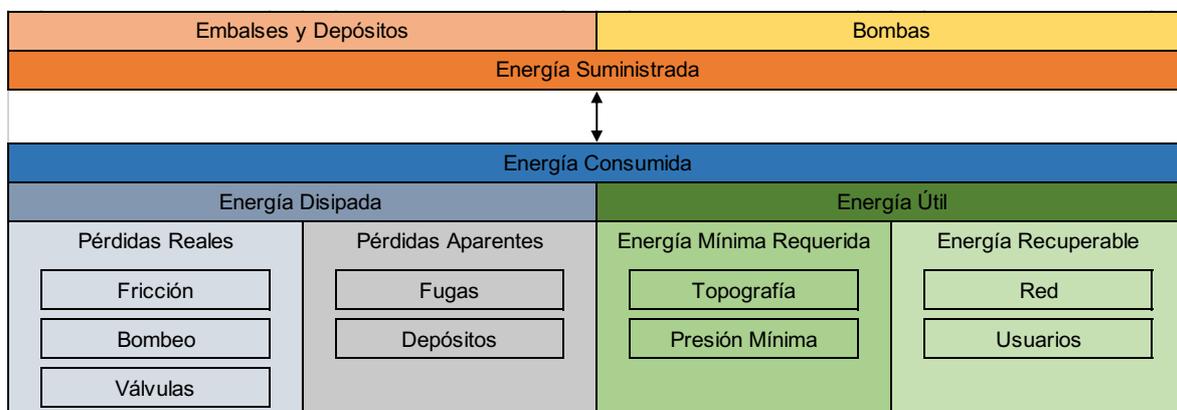


Figura 18. Balance energético de un SDA (Iglesias-Castelló et al. 2018).

La energía suministrada a la red (E_{sum}) puede proceder de 2 fuentes claramente diferenciables: la energía potencial almacenada en embalses o depósitos de agua elevados respecto a la red (E_e) y aquella energía electromecánica que es suministrada por grupos de bombeo (E_b). Por otra parte, la energía consumida (E_{con}) se desglosa en un mayor número de términos en su análisis. Sin embargo, es posible separarlas entre energía disipada o perdida (E_d) y energía útil (E_u).

La energía disipada abarca todos aquellos acontecimientos en los que se produce una pérdida de energía. No obstante, es factible diferenciar dos grandes bloques: las pérdidas reales ($E_{d,r}$) y las pérdidas aparentes ($E_{d,a}$). Las pérdidas reales corresponden a toda la energía disipada, la cual no produce beneficio alguno. Dentro de ellas es posible identificar:

- Pérdidas por fricción ($E_{d,f}$), las cuales son originadas por la turbulencia del flujo a lo largo de las conducciones.
- Pérdidas en los grupos de bombeo ($E_{d,b}$), las cuales se deben principalmente a la ineficiencia de las bombas y de los equipos electromecánicos asociados (motores eléctricos, inversores de frecuencia, etc.).
- Pérdidas en las válvulas ($E_{d,v}$), las cuales son producidas por los diferentes elementos de maniobra y control presentes a lo largo de un SDA que introducen pérdidas de energía controladas en el sistema.

Por otra parte, existen otras pérdidas asociadas a la energía disipada: las pérdidas aparentes. Se clasifica como aquella energía que no ha sido entregada finalmente a los usuarios, pero que sin embargo no es posible considerarla como una disipación energética, por lo cual no puede ser nominada como tal. Dentro de las pérdidas aparentes es posible diferenciar:

- Pérdidas por fugas ($E_{d,l}$), las cuales son originadas por defectos y fisuras en el sistema lo que conlleva a una mala utilización de la energía que finalmente no es entregada a los usuarios, sino que va a un destino inadecuado como lo es el subsuelo.
- Pérdidas de energía por acumulación de agua en los depósitos ($E_{d,d}$), las cuales se definen como la cantidad de energía potencial que se acumula en los depósitos. Estas pérdidas se originan, si al realizar un análisis a lo largo de un periodo de tiempo el nivel de agua final en los depósitos es mayor que el nivel inicial. A efectos del balance es considerada como una pérdida. No obstante, no puede ser considerada como tal, ya que esta energía potencial puede ser aportada con posterioridad. En el caso supuesto que el nivel de agua final del depósito tras el análisis sea inferior al inicial se debe considerar como una energía aportada y no disipada.

Todo el resto de la energía consumida se denomina energía útil, la cual es entregada finalmente a los usuarios. De la misma manera, esta energía es posible considerarla como la suma entre la energía mínima requerida en los nudos (E_{min}) y la energía potencialmente recuperable (EPR). La energía mínima requerida es posible expresarla como la suma de la energía topográfica ($E_{u,t}$) y la energía de presión mínima en los nudos ($E_{p,min}$). La energía potencialmente recuperable representa el exceso de energía sobre el mínimo suministrado a los nudos.

En principio la totalidad de este excedente puede ser recuperado por los usuarios (EPR_u) conectados directamente a los nudos. No obstante, dependiendo la orografía del SDA, existe una fracción de esta energía la cual puede ser recuperada por la red (EPR_R) a través de dispositivos (Microturbinas, PATs) que pueden ser instalados a lo largo del sistema con el objetivo de reducir el exceso de energía que existe en los nudos.

$$E_{sum} = E_{con} \quad (16)$$

$$E_{sum} = E_e + E_b \quad (17)$$

$$E_{con} = E_d + E_u \rightarrow \begin{cases} E_d = E_{d,r} + E_{d,a} \rightarrow \begin{cases} E_{d,r} = E_{d,f} + E_{d,b} + E_{d,v} \\ E_{d,a} = E_{d,l} + E_{d,d} \end{cases} \\ E_u = E_{u,t} + E_{u,p} = E_{min} + EPR \rightarrow \begin{cases} E_{min} = E_{u,t} + E_{p\ min} \\ EPR = EPR_u + EPR_R \end{cases} \end{cases} \quad (18)$$

4.3 METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EPR DE UN SDA PARA CONSUMOS INDEPENDIENTES DE LA PRESIÓN

Los consumos en un SDA se asignan en los nudos como valores constantes de la demanda. De esta manera, al realizar una simulación hidráulica estos se representan como una demanda base para el nudo. Esta demanda base supone admitir que el consumo en dicho punto es conocido a priori independientemente de la presión existente en los nudos. Es lo que se denominan consumos independientes de la presión.

En los SDA es posible encontrar una importante cantidad de puntos donde existe un exceso de presión respecto de la presión mínima requerida, este exceso de presión representa un exceso de energía suministrada en estos nudos. Una forma de captar esta energía la cual no se está utilizando es a través de dispositivos de recuperación de energía.

Un recuperador energético (RE) es un elemento o dispositivo el cual genera de manera controlada una pérdida de carga en forma de presión sobre la red, imitando el funcionamiento de la instalación de una válvula. Sin embargo, al contrario que una válvula, este tipo de dispositivos se instalan con el objetivo de recuperar esta energía disipada, la cual puede ser almacenada o bien reincorporada como parte de procesos secundarios dentro de la red.

4.3.1 Recuperación de energía en la red

La metodología detrás de la energía potencialmente recuperable propone la instalación de RE en puntos específicos de la red para cumplir con la presión mínima requerida sin afectar el funcionamiento del servicio. A modo de ejemplo, se presenta la instalación de la Figura 19. Se puede observar que en el sistema inicial a cada uno de los nudos de consumo de la red se les representó de manera gráfica el nivel de presión mínima requerida (color verde). De la misma manera, se puede identificar la línea de alturas piezométricas para los caudales circulantes de la red (color rojo).

Bajo estas circunstancias, es posible instalar dispositivos de RE (representadas como válvulas) a lo largo de las distintas líneas de la red para adaptar la línea de alturas piezométricas a los valores mínimos requeridos de presión que permitan un correcto funcionamiento del sistema. En el sistema con recuperadores, se puede observar en el perfil de presiones de la instalación una vez incorporados estos dispositivos, donde la línea de

alturas piezométricas de los caudales circulantes (color magenta) se ajusta cada vez que encuentra con un RE en el sentido de orientación del flujo.

$$ER = \gamma \cdot \Delta H \cdot Q \quad (19)$$

Esta metodología apunta a la instalación de dispositivos de RE siempre y cuando la presión de cada uno de los nudos de la red sea superior a la energía mínima requerida. Solo puede ser recuperado el exceso de energía que se encuentra dentro de la red, como bien se explicó, la energía potencialmente recuperable (EPR).

Como punto importante, una condición de la hipótesis que sostiene esta metodología y que se debe cumplir, es que para poder instalar RE dentro de la red la distribución de los caudales circulantes se debe mantener igual tanto antes como después de la instalación de los dispositivos.

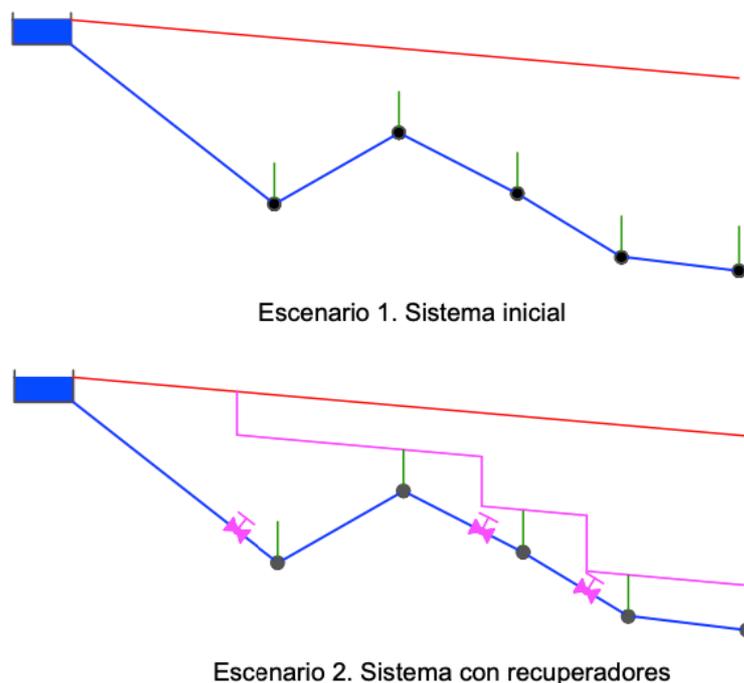


Figura 19. Esquema del funcionamiento de un sistema que incorpora recuperadores de energía.

Lo que se busca es comparar con esta metodología es la energía potencialmente recuperable que se encuentra presente en la red respecto de la energía que circula a través del sistema bajo condiciones normales de funcionamiento, con el objetivo de analizar la resiliencia de la red en base a un indicador de rendimiento y eficiencia energética.

4.3.2 Ubicación del recuperador de energía

A través de esta metodología, además de la instalación de un dispositivo que permita la RE, se pretende minimizar los riesgos asociados a la cavitación, depresión, intrusión o colapso del sistema. De manera gráfica como se observa en la Figura 20, si el dispositivo se instala al inicio de la línea, la presión aguas abajo desciende considerablemente por ende existe el riesgo de producirse un colapso en la red.

La mejor ubicación para la instalación del dispositivo es al final de la línea, ya que la presión aguas abajo de este punto corresponde a la mínima requerida en el nudo lo que elimina el

riego de colapso en la red. Cabe mencionar, que cuanto mayor es la presión aguas abajo del RE menor es el riesgo de que se produzca cavitación, por lo cual la correcta ubicación de este tipo de dispositivos dentro de la red es fundamental para evitar riesgos que puedan perjudicar el funcionamiento del sistema.

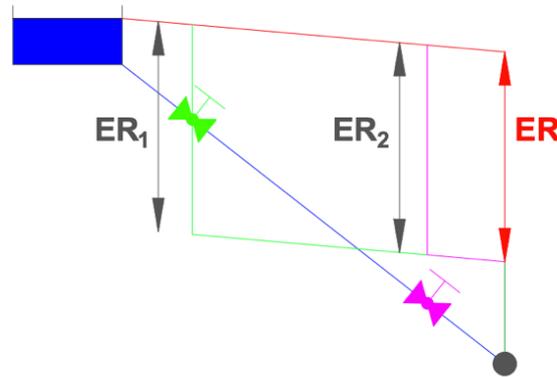


Figura 20. Esquema de ubicaciones de un recuperador de energía.

4.3.3 Descripción general de la metodología para la recuperación de energía

Para determinar la EPR de un SDA se tomará como ejemplo la red de la Figura 21, en la cual se presentan dos escenarios diferentes en cuanto a su funcionamiento. En el primer escenario es posible observar que la bomba se encuentra en marcha suministrando agua hacia el depósito. En el segundo escenario la bomba se encuentra detenida y la red se alimenta únicamente a partir del depósito.

Si se analizan ambos escenarios, se puede observar que en ambos existe un exceso de presión sobre la presión mínima requerida, la cual para este caso se fijó en 20 mca. No obstante, en el Escenario 1 no es posible instalar ningún dispositivo de RE, ya que la instalación de cualquier elemento que produzca una reducción de la presión supone alterar los caudales circulantes a través de la red, contradiciendo la hipótesis que se ha adoptado como base de la metodología. Por otra parte, en el Escenario 2 es posible la instalación de dispositivos de RE en diversos puntos de la red.

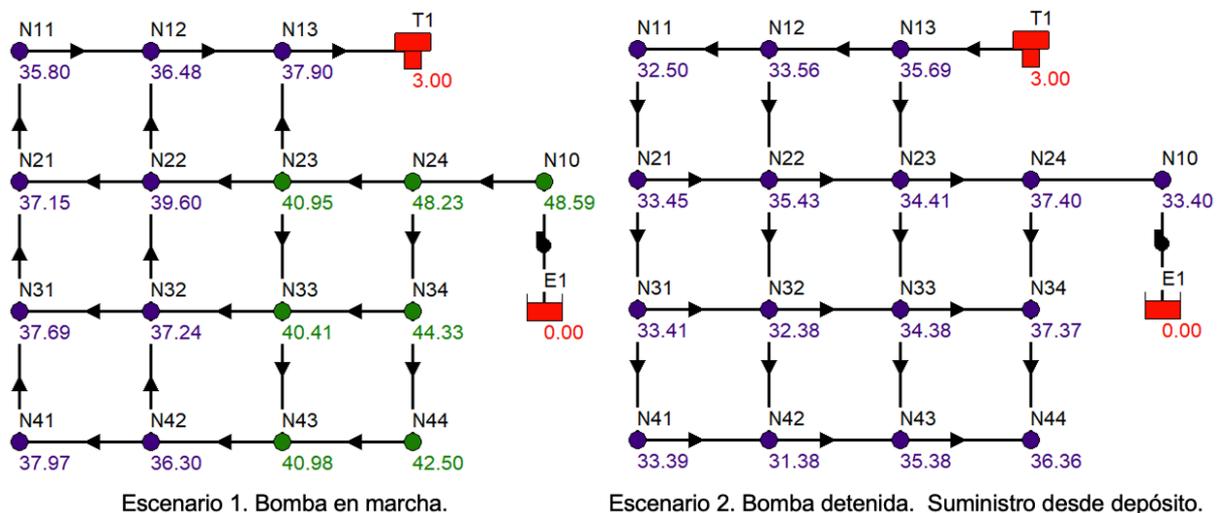


Figura 21. Red de ejemplo A.

El primer paso de la metodología, que se presenta de manera gráfica en Figura 22, consiste en la identificación y localización de los Nudos Origen Iniciales (NOI). Un nudo de origen es aquel nudo que se encuentra conectado a la primera línea en la que se puede instalar un dispositivo de RE. Esto quiere decir, que los principales NOI dentro de un SDA corresponden a aquellos nudos en los cuales la presión es conocida, como por ejemplo, los embalses y depósitos.

A partir de aquí, se continua con la anulación de aquellos tramos de la red donde no es posible instalar un RE. Para ello, se inicia desde los NOI y en el sentido del flujo se recorre la red hasta identificar todos los NOI que se encuentran interconectados, ya que en estos tramos no es posible instalar un dispositivo de RE debido a que su instalación modificaría la distribución inicial de los caudales en la red. En el Escenario 1 se anulan todas conducciones. Por el contrario, en el Escenario 2 únicamente existe un NOI, por lo cual ninguna conducción se anula.

Una vez ejecutado el primer paso, se procede a la definición de los Nudos Origen (NO). Estos NO corresponden a aquellos nudos donde comienza la anulación de los tramos de la red. Estos tramos anulados se caracterizan por ser aquellos que conectan entre sí distintos nudos origen siguiendo la orientación del caudal obtenidas a través de la simulación hidráulica del modelo matemático.

Este proceso de anular líneas de la red incorpora implícitamente la definición de nuevos NO en el sistema. Para el Escenario 2, no se anulan conducciones por lo cual los NOI se convierten en NO. Para definir estos nuevos NO como requisito se debe realizar una simulación hidráulica de la red. En este análisis se recalcula las presiones de la red, mientras que la hipótesis inicial de caudales circulantes se mantiene.

A continuación, se procede a identificar el Nudo Critico (NC) de la red. Un NC es aquel nudo de consumo el cual presenta la menor diferencia de energía entre la presión obtenida (P_i) y la presión mínima requerida (P_{min}) para el funcionamiento del sistema, representando de esta manera la caída de presión (ΔH_{RE}) o expresada de otra forma como aquella energía que es potencialmente recuperable a través de estos dispositivos.

$$\Delta H_{RE} = \frac{P_i}{\gamma} - \frac{P_{min}}{\gamma} \quad (20)$$

Posteriormente, se procede a la instalación de los dispositivos de RE en todas aquellas líneas activas que se encuentran conectadas a NO, donde la recuperación energética corresponde al valor de la caída de presión calculada.

Finalizado este proceso, se analizan todos aquellos tramos donde no es posible instalar un RE, con esto se procede a anular los tramos que conectan desde el NC hasta los NO en la dirección de circulación del caudal hacia aguas arriba. Este proceso de se lleva a cabo de forma repetitiva hasta que no haya ningún nudo disponible dentro del sistema.

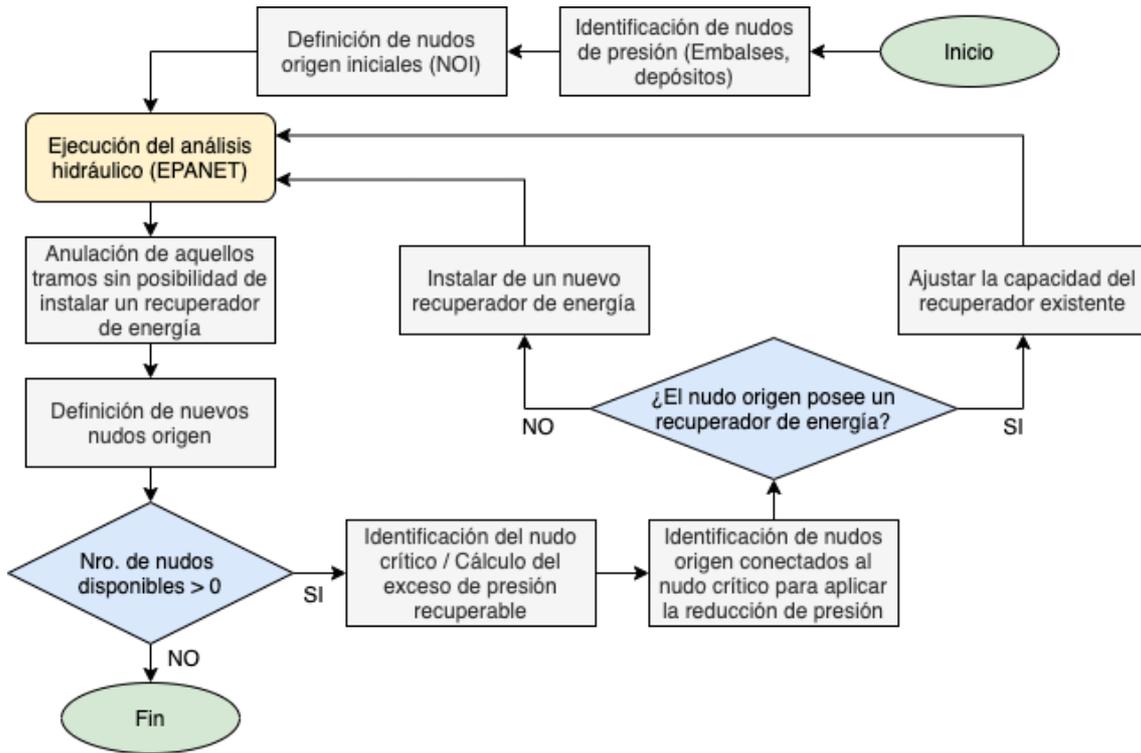
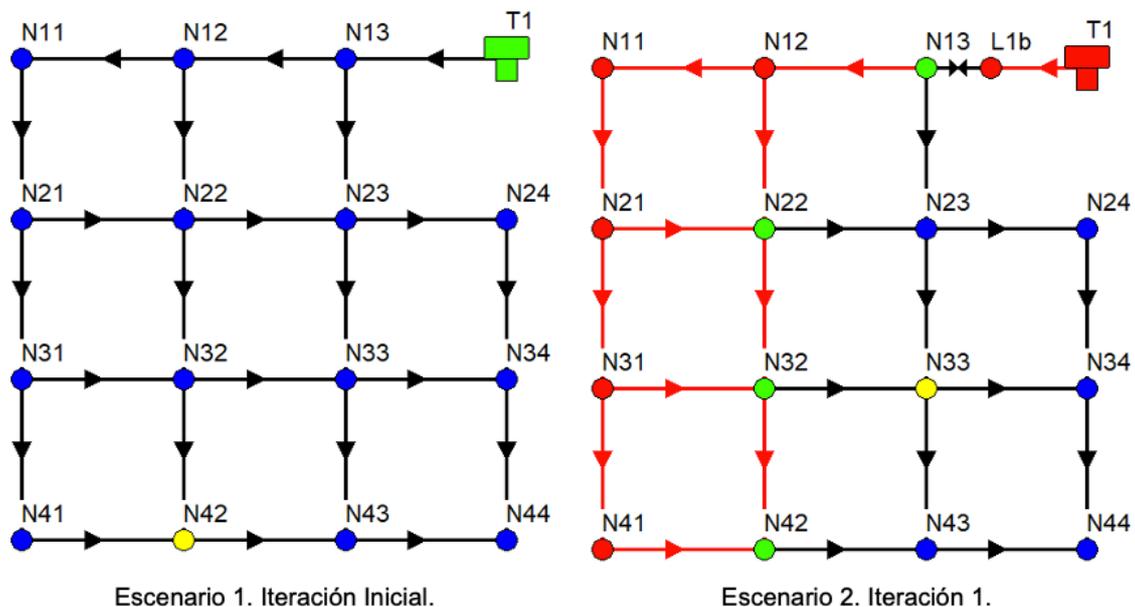


Figura 22. Diagrama de flujo de la metodología para la recuperación de energía en un SDA.

4.3.4 Ejemplo de aplicación de la metodología

A continuación, se presenta de manera esquemática en la Figura 23 la metodología aplicada al Escenario 2, el cual ha sido simplificado debido a que la bomba no se encuentra en funcionamiento. El único NO para este caso es el nudo T1 correspondiente al depósito, por ende, para el primer barrido no se anula ninguna conducción (Iteración inicial). A partir de la primera iteración, se identifica el NC el cual corresponde al N42 que presenta una presión inicial de 31.38 metros, lo que supone una recuperación de energía de 11.38 metros. Para ello se añade un RE en la línea T1-N13 (Iteración 1).



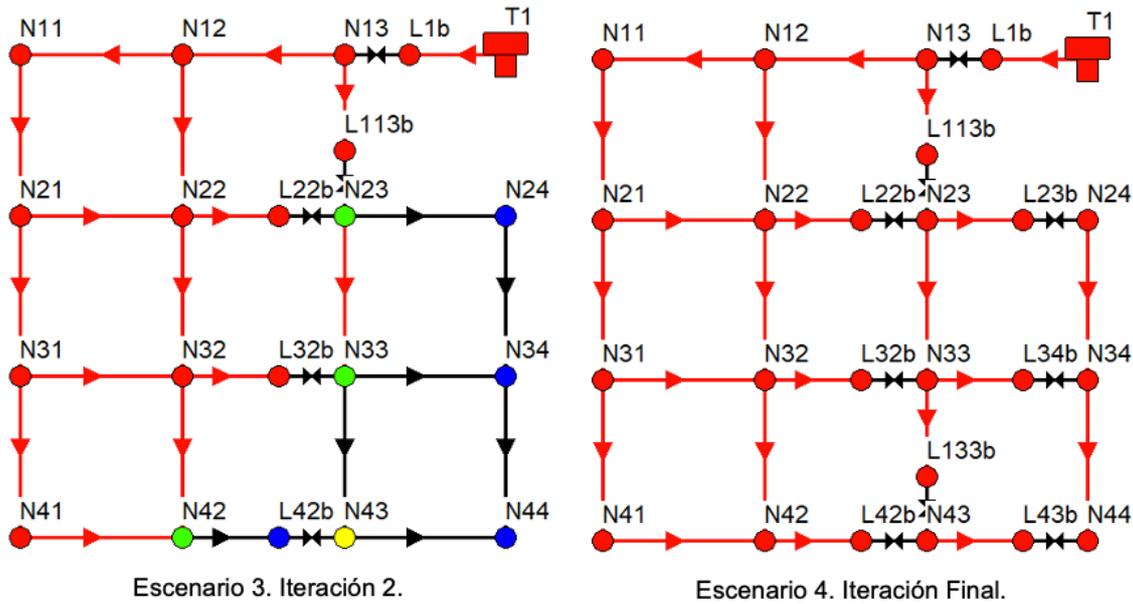


Figura 23. Resolución de la red ejemplo A.

La incorporación de un RE produce la anulación de las conducciones marcadas en rojo (Iteración 1) con el objetivo de mantener la presión en el nudo N42 en 20 metros. Debido a esto, se genera la aparición de los nuevos NO (N13, N22, N32 y N42). Para la siguiente iteración del ciclo, el NC corresponde al N33, con una presión inicial de 23.01 metros. Para reducir la presión de este nudo a la mínima requerida, se deben introducir 4 nuevos dispositivos de RE en las líneas N13-N23, N22-N23, N32-N33 y N42-N43, cada una con valor de energía en forma de presión recuperada de 3.01 metros.

La solución definitiva (Iteración final) se lleva a cabo tras introducir los últimos 4 RE, ya que quedan anuladas todas las conducciones debido a que en ninguna de ellas es posible instalar este tipo de dispositivos si alterar los caudales circulantes, finalizando de esta manera el proceso de la metodología.

A continuación, en la Tabla 6 se presenta un análisis de la EPR de la red en términos del balance energético del SDA correspondiente a la red ejemplo.

Tabla 6. Balance energético de los principales elementos de la red ejemplo.

	Caudal (l/s)	Altura (m)	Potencia (kW)
Energía Suministrada (E_{sum})	31.50	11.38	3.52
Energía Disipada (E_d)	3.10	3.01	0.09
Energía Útil (E_u)	1.52	3.01	0.04
Energía Mínima (E_{min})	1.68	3.01	0.04
Energía Recuperada (ER)			3.70

4.3.5 Índice de energía potencialmente recuperable

El Índice de Energía Potencialmente Recuperable (PREI) se formula a través del estudio realizado por Iglesias-Castelló et al. (2018) quienes representan el ratio existente entre la energía potencialmente recuperable en la red (EPR_R) respecto de la energía total suministrada (E_{sum}), la energía mínima requerida (E_{min}) y la energía disipada (E_d). Por lo cual, se incorpora

la utilización de válvulas de rotura de carga (PBV) como elemento de disipación para cuantificar el exceso de energía en forma de presión que puede ser recuperada a lo largo del SDA. Este indicador de tipo determinista puede tomar valores superiores a uno ($0 \leq PREI$), matemáticamente se expresa como:

$$PREI = 1 + \frac{EPR_{v,t}}{E_{e,t} + E_{b,t} - E_{min,t} - E_{d,t}} \quad (21)$$

$$EPR_{v,t} = \sum_{v=1}^U \sum_{t=0}^{N_{inst}} Q_{v,t} \cdot \Delta h_{v,t} \cdot \Delta t_t \quad (22)$$

$$E_{e,t} = \sum_{k=1}^R \sum_{t=0}^{N_{inst}} D_{out_{k,t}} \cdot H_{k,t} \cdot \Delta t_t \quad (23)$$

$$E_{b,t} = \sum_{j=1}^P \sum_{t=0}^{N_{inst}} \left(\frac{P_{j,t}}{\gamma} \right) \cdot \Delta t_t \quad (24)$$

$$E_{min,t} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^{N_{inst}} D_{i,t} \cdot H_{i,t}^{(req)} \cdot \Delta t_t \quad (25)$$

$$E_{d,t} = \sum_{k=1}^S \sum_{t=0}^{N_{inst}} \frac{\gamma \cdot A_k}{2} \cdot (h_{k,t}^2 - h_{k,t-1}^2) \cdot \Delta t_t \quad (26)$$

Donde:

- U corresponde al conjunto de válvulas de rotura de carga.
- $Q_{v,t}$ es el caudal que circula por la válvula de rotura de carga v en el instante t .
- $\Delta h_{v,t}$ corresponde a la consigna de la válvula de rotura de carga v para el instante t .
- Δt_t corresponde al periodo de análisis para el instante t .
- R es el conjunto de nudos origen o fuentes.
- P corresponde al conjunto de bombas.
- N representa el conjunto de nudos de consumo.
- S corresponde el conjunto de depósitos.
- A_k es la superficie donde se acumula el agua en el depósito k .
- $h_{k,t}$ es el valor de la cota de la lámina de agua en el depósito k para el instante t .
- $h_{k,t-1}$ corresponde a la cota del nivel mínimo de la lámina de agua en el depósito k para el instante $t - 1$.

A partir del balance energético de un SDA y en la obtención de la EPR es que Iglesias-Castelló et al. (2018) definen dos índices diferentes basados en cálculos energéticos; un índice de eficiencia energética (IEE) y un índice de recuperación energética (IER). El índice basado en eficiencia energética representa la capacidad de la red para recuperar energía considerando la relación existente entre el EPR y la energía total consumida (E_{con}). Mientras

que el índice de recuperación de energía representa el porcentaje de energía recuperada (ER) respecto de la energía potencialmente recuperable en la red (EPR_R). Ambos índices están formulados de forma que su valor tienda a 1 cuando la ER es máxima. Matemáticamente se pueden expresar como:

$$IEE = 1 - \frac{EPR}{E_{con}} \quad (27)$$

$$IER = 1 - \frac{EPR_R}{EPR_R + ER} \quad (28)$$

4.4 CASOS DE APLICACIÓN

Una vez el algoritmo de cálculo del PREI ha sido integrado dentro del modelo informático desarrollado para el análisis y evaluación de la resiliencia de un SDA, se procede a la prueba del funcionamiento de la aplicación y específicamente de este nuevo indicador. Para ello, se presentan a manera de resumen las 3 redes estudio de carácter académico investigativo, obtenidas a través de diferentes portales ligados a la investigación de SDA, las cuales han sido utilizadas para probar el modelo informático desarrollado y obtener mediante cálculo la resiliencia de las redes.

4.4.1 Anytown System

La red Anytown System (ver Figura 24) presentada por primera vez por Walski et al. (1987) para la “*Battle of the Networks*” representa un sistema de distribución de agua de una comunidad hipotética en Estados Unidos. La ciudad esta formada alrededor del casco antiguo en el centro de la localidad. Esta red se compone por 3 embalses de cabecera, 1 bomba, 19 nudos de consumo y 40 tuberías. La demanda nodal promedio es de $1453.60 \text{ m}^3/\text{h}$ y la longitud total de las tuberías de la red es de 35.18 km con diámetros entre 203 y 406 milímetros.

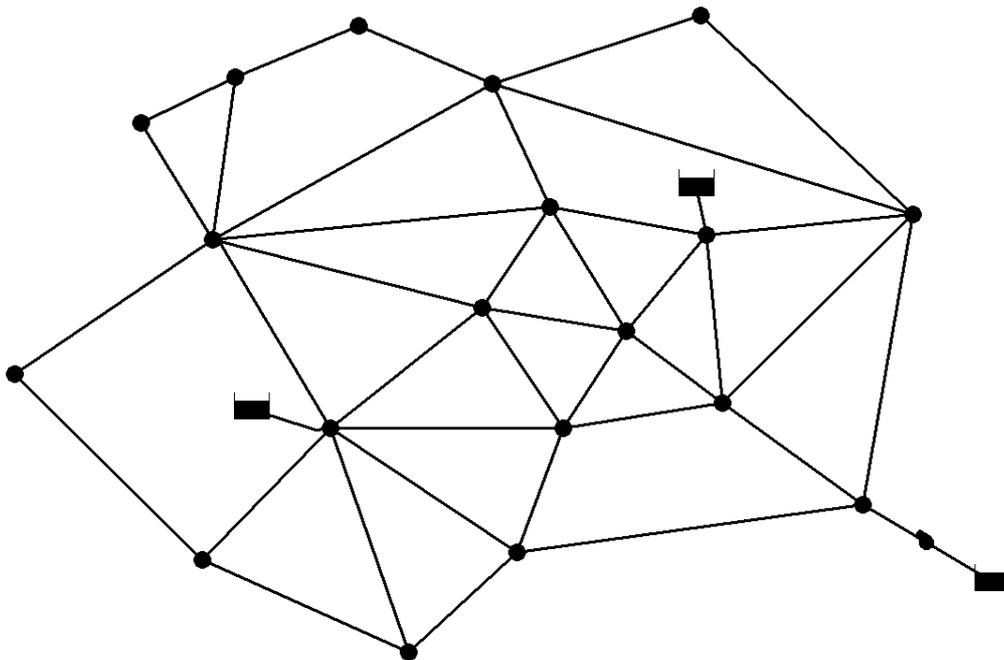


Figura 24. Modelo matemático de la red Anytown System.

A continuación, en la Figura 25 y en la Figura 26 se presentan algunas de las propiedades de los elementos que componen el sistema como son el patrón de demanda de los nudos de consumo y la curva de la bomba que incorpora el sistema.

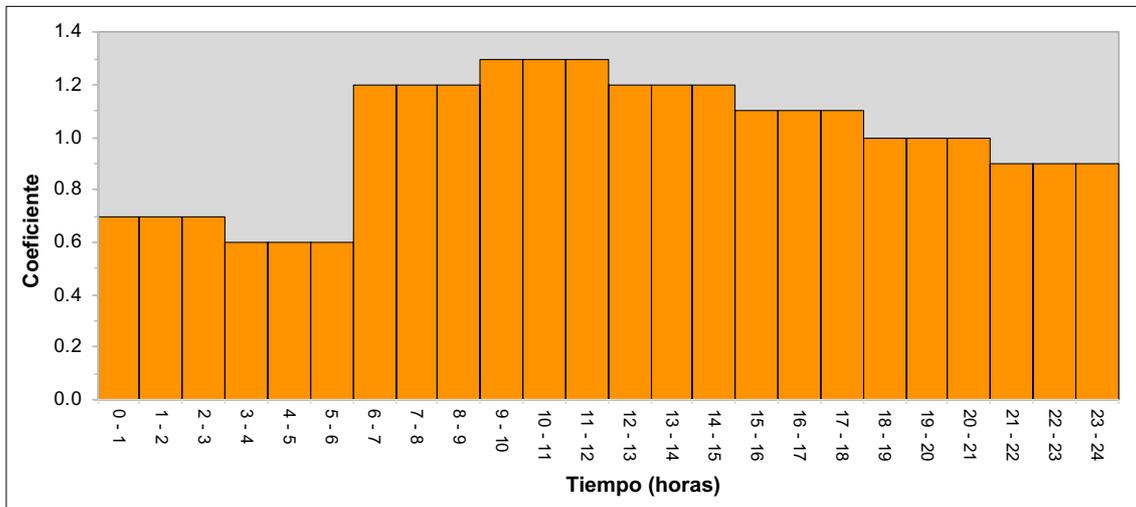


Figura 25. Patrón de demanda de los nudos de consumo.

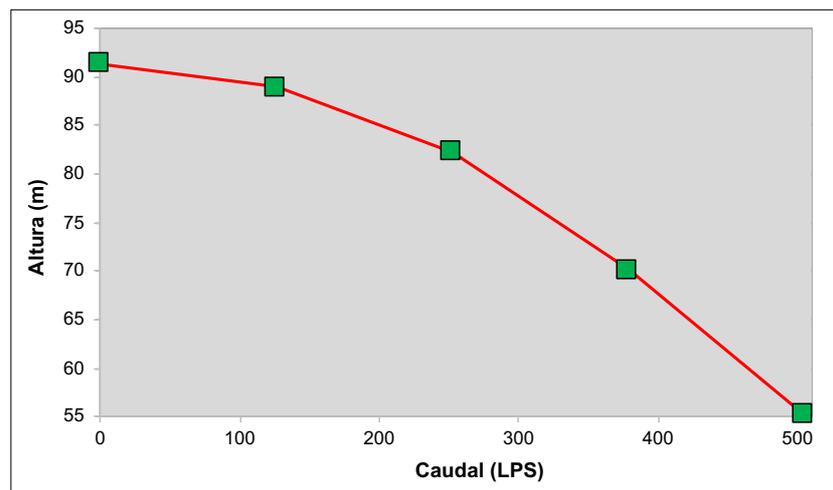


Figura 26. Curva de la bomba.

4.4.2 Network 3

La red Network 3 (ver Figura 27) corresponde a una red real basada en el modelo de la red de abastecimiento de Cherry Hill-Brushy Plains. Esta red cual fue presentada por primera vez por Clark et al. (1995) utilizada para presentar el modelo de calidad de EPANET. Esta red se estructura mediante 2 embalses de cabecera, 3 depósitos elevados, 2 bombas, 92 nudos de consumo y 117 tuberías. La demanda nodal promedio es de 3678.62 m³/h y la longitud total de las tuberías de la red es de 65.75 km con diámetros entre 8 y 99 pulgadas.

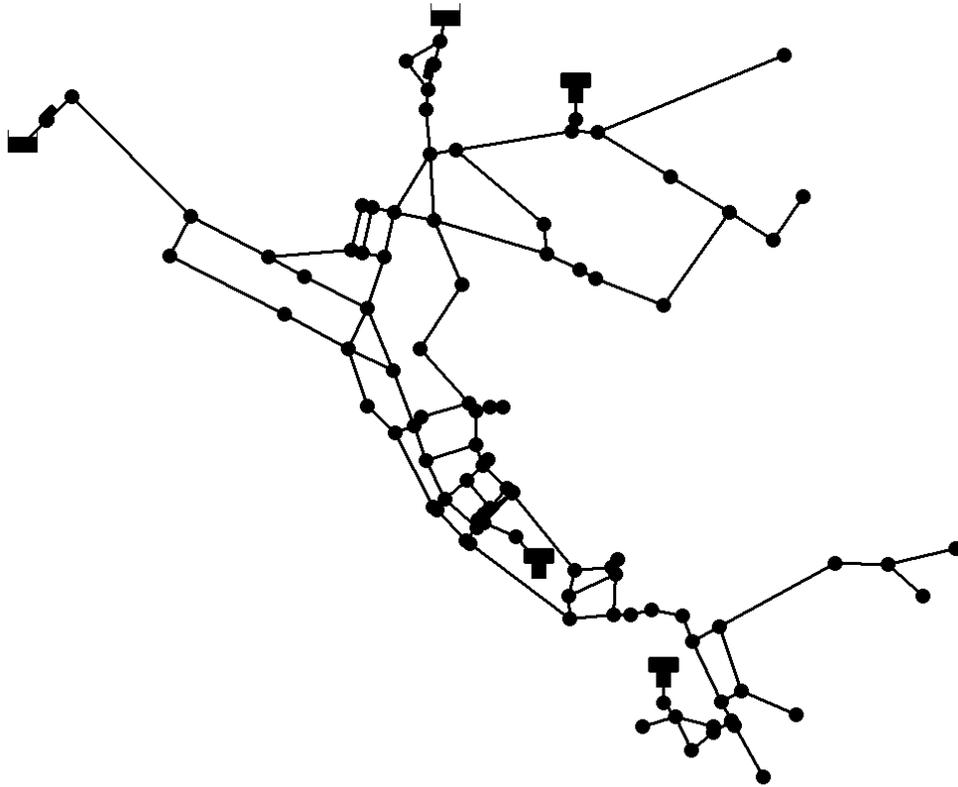


Figura 27. Modelo matemático de la red Network 3.

A continuación, en la Figura 28, Figura 29, Figura 30, Figura 31 y en la Figura 32 presentan algunas de las propiedades de los elementos que componen el sistema como lo son; el patrón de demanda de los nodos de consumo, curvas de bombeo y los controles que regulan los niveles de agua en los depósitos que incorpora el sistema.

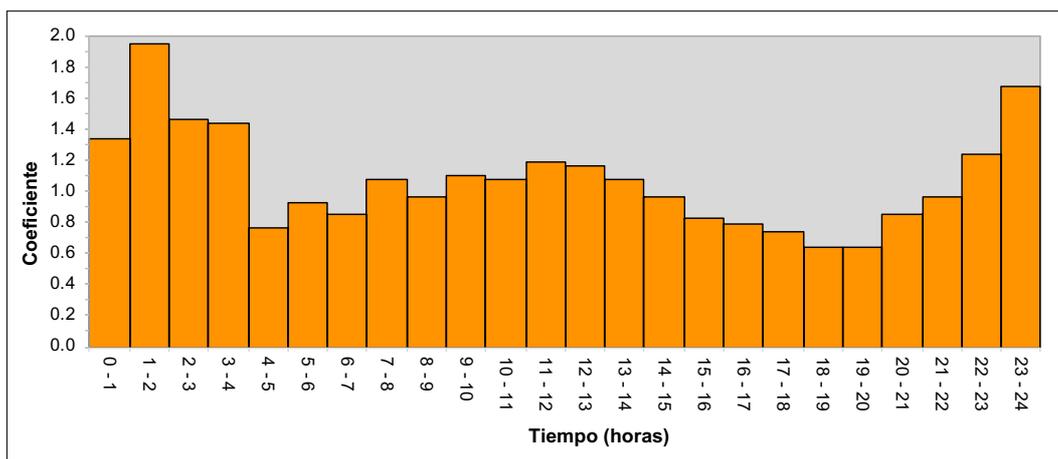


Figura 28. Patrón de demanda de los nodos de consumo.

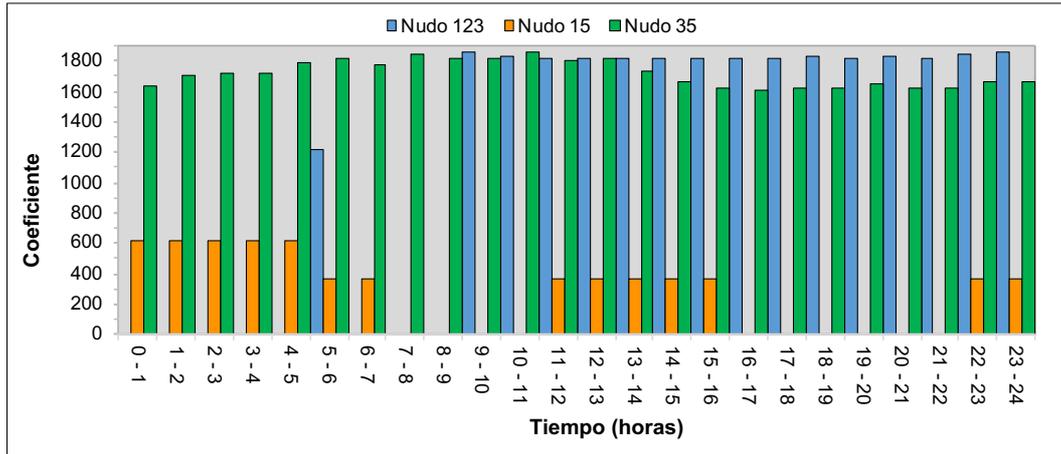


Figura 29. Patrones de demanda para los nudos 15, 35 y 123.

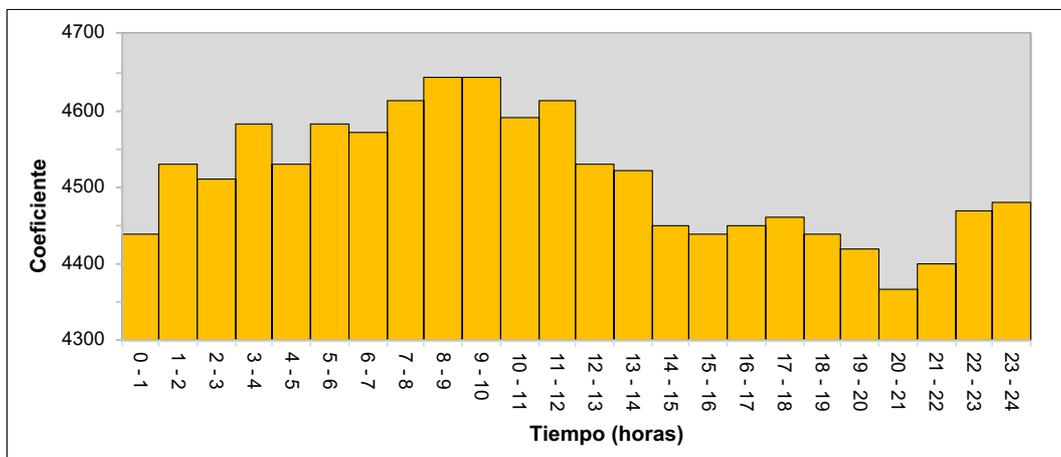


Figura 30. Patrón de demanda para el nudo 203.

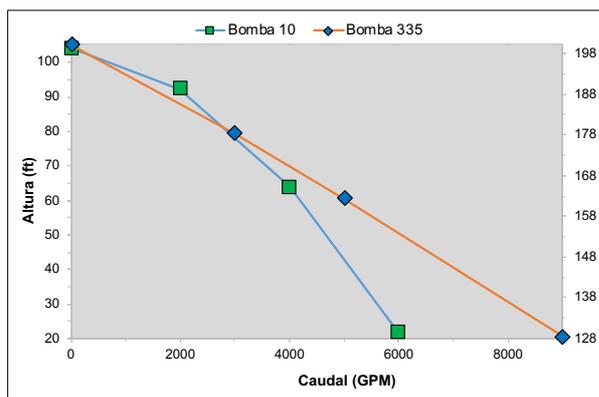


Figura 31. Curvas de las bombas 10 y 335.

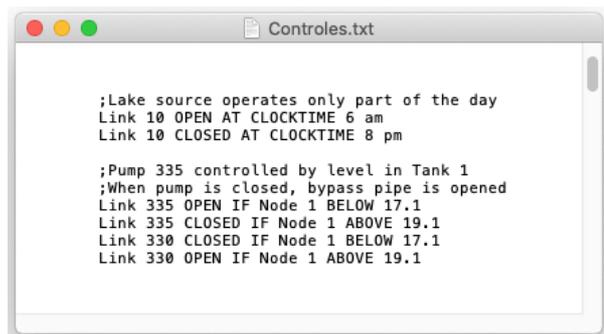


Figura 32. Controles de las bombas.

4.4.3 C-Town

La red C-Town (ver Figura 33) presentada por Ostfeld et al. (2012) como parte de la “*Battle of the Calibration Networks Systems*” y optimizada por Iglesias-Rey et al. (2012), la cual se basa en una red real de tamaño mediano conformada por cinco sectores claramente definidos. La red se compone por 1 embalse de cabecera, 7 depósitos elevados, 13 bombas, 399 nudos

de consumo, 462 tuberías y 5 válvulas. La demanda nodal promedio es de 1520.17 m³/h y la longitud total de las tuberías de la red es de 62.93 km con diámetros entre 51 y 711 milímetros.

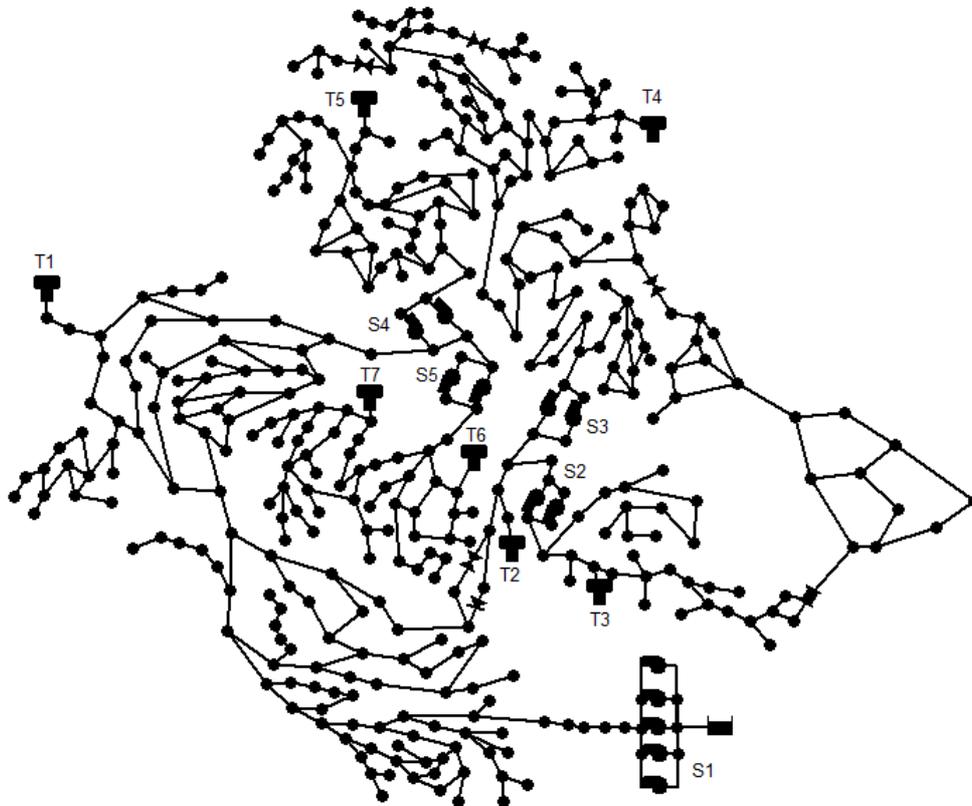


Figura 33. Modelo matemático de la red C-Town.

A continuación, en la Figura 34, Figura 35, Figura 36 y en la Figura 37 se presentan algunas de las propiedades de los elementos que componen el sistema como lo son; el patrón de demanda de los nodos de consumo y las curvas de bombeo que incorpora el sistema.

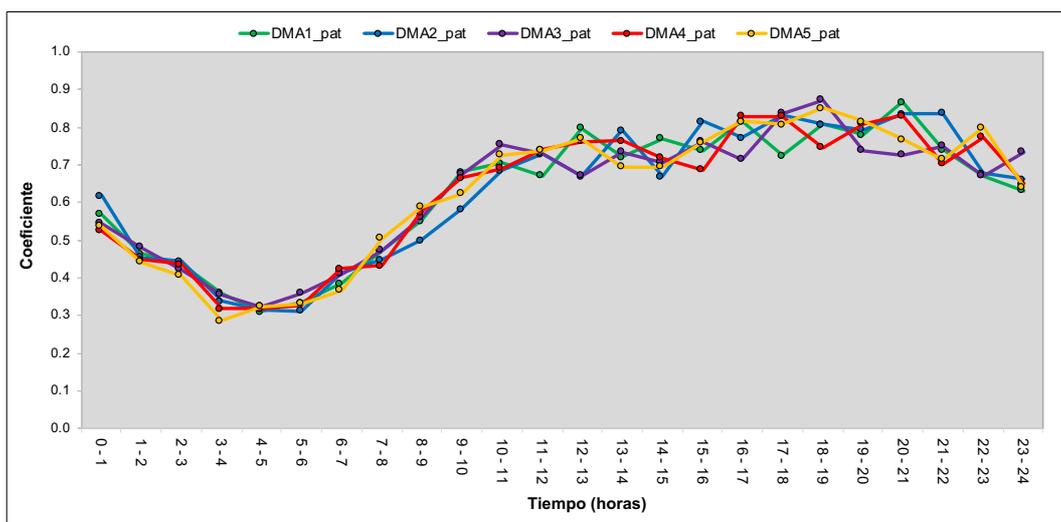


Figura 34. Patrones de demanda de los nodos de consumo.

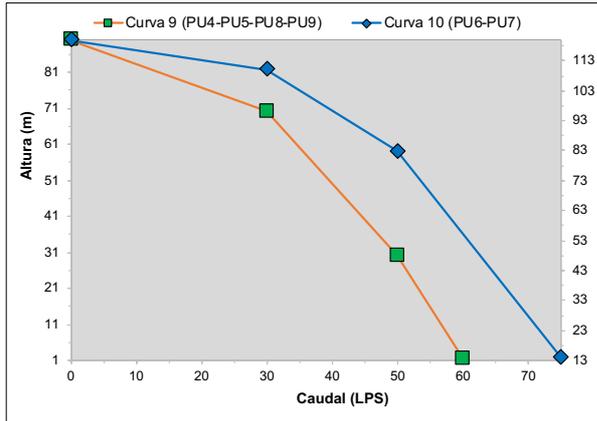


Figura 35. Curva de las bombas PU4, PU5, PU6, PU7, PU8 y PU9.

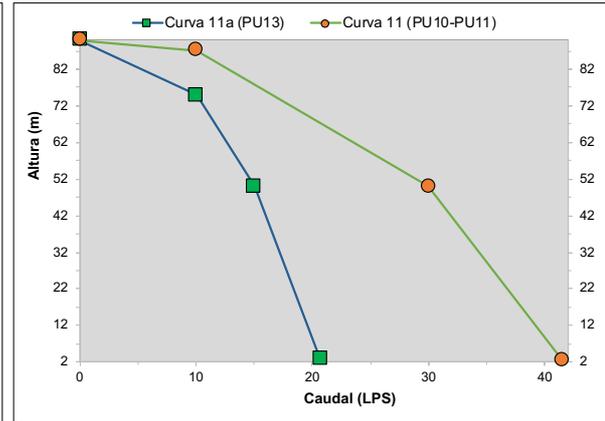


Figura 36. Curvas de las bombas PU10, PU11 y PU13.

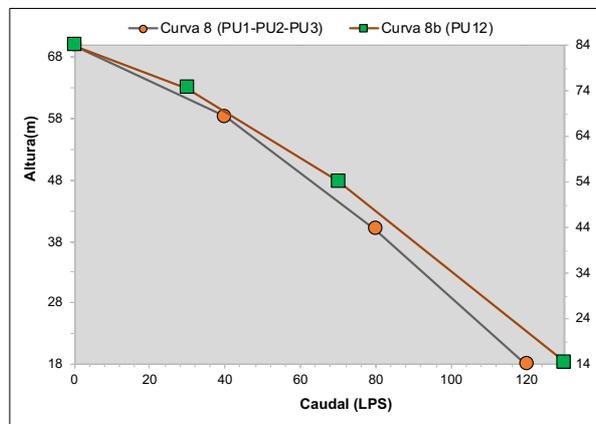


Figura 37. Curvas de las bombas PU1, PU2, PU3 y PU12.

4.5 PRESENTACIÓN DE CASOS

Una vez ajustado el modelo informático desarrollado para este proyecto de estudio y realizadas las correspondientes simulaciones previas a través de modelos matemáticos de prueba, se procede a la aplicación de la herramienta computacional a los SDA previamente seleccionados.

4.5.1 Aplicación del PREI a la red Anytown System

Para la aplicación del PREI a la red Anytown System con el objetivo de analizar y evaluar la resiliencia del sistema, como primer paso se establece el valor de la presión mínima requerida para los nudos de consumo de la red, para este caso correspondiente a 15 mca. Cabe señalar que, para cada periodo de análisis dentro de la configuración del modelo matemático de la red, el cual corresponde a 24 instantes de tiempo, se obtiene una solución particular e independiente, la cual cumple con cada una de las condiciones establecidas en la metodología planteada para el correcto funcionamiento del sistema.

A manera de ejemplificar la resolución de la red, en la Figura 38 se presentan los resultados correspondientes a la simulación hidráulica para el instante 09:00 hrs bajo condiciones normales de funcionamiento, el cual, previo a un análisis realizado, es identificado como aquel instante de tiempo donde se presenta la mayor variación entre la energía

suministrada y la energía consumida. También es el instante correspondiente a la máxima demanda.

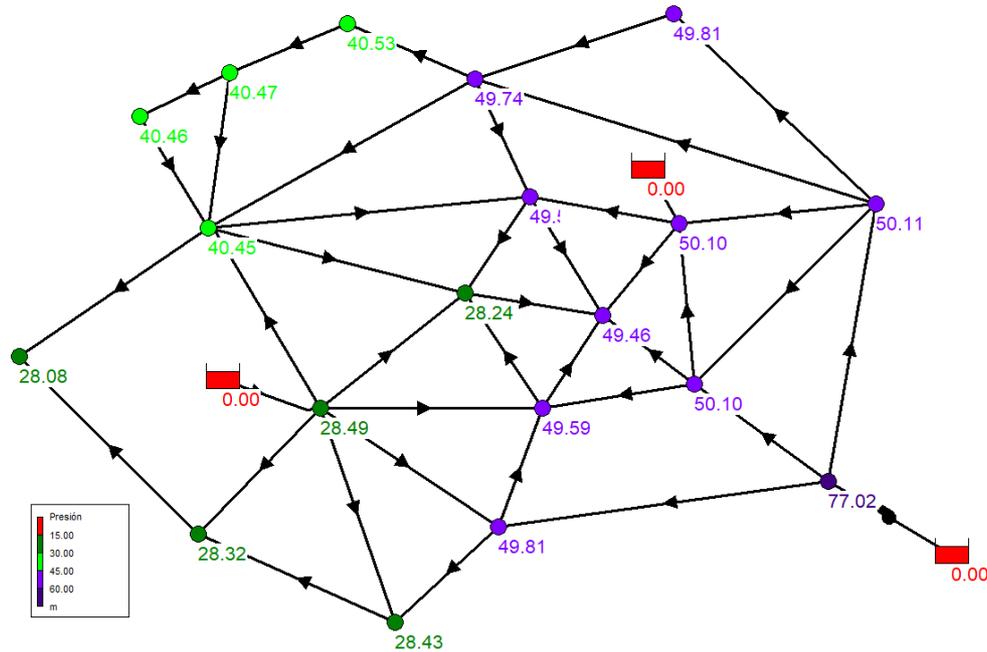
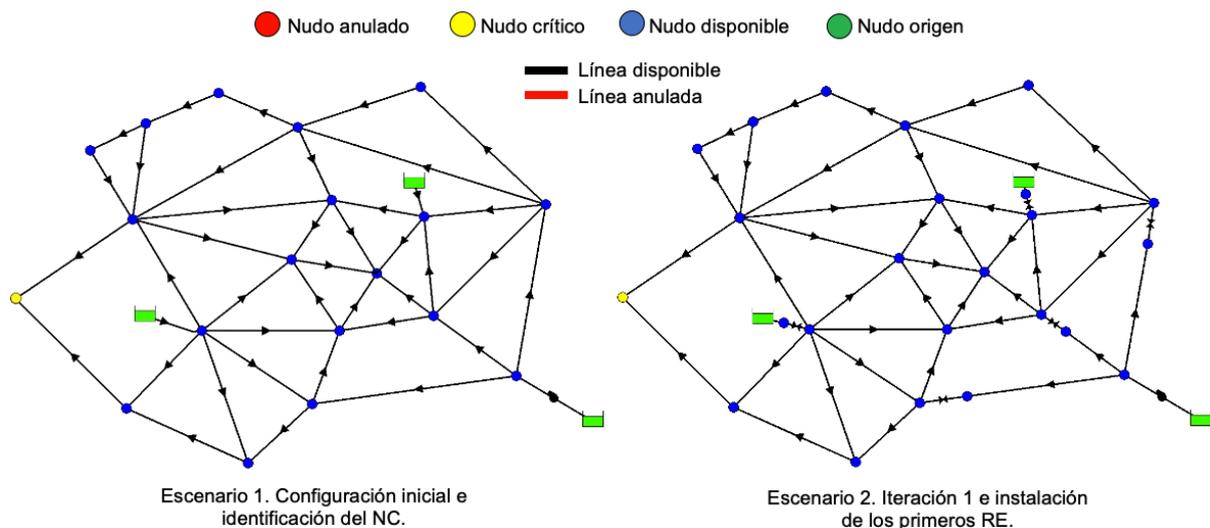


Figura 38. Resultante de presiones y caudales circulantes de la red Anytown System para las 09:00 hrs.

Si se analizan con detalle estos resultados, se puede observar que todos los nodos de la red presentan un exceso de presión sobre el valor de presión mínima requerida, con nodos de consumo que superan los 28.08 metros alcanzando inclusive los 77.02 metros, lo cual aporta una recuperación de energía en forma de presión de al menos 13.08 metros.

En la Figura 39 se presenta el esquema de resolución resumido de la aplicación del PREI como indicador de resiliencia para la red Anytown System en el instante de análisis 09:00 hrs.



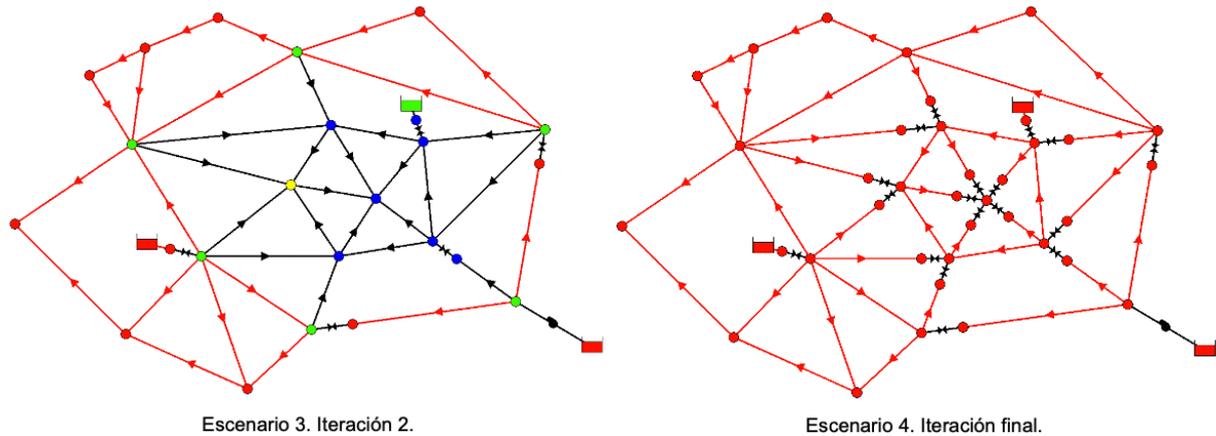


Figura 39. Resolución de la red Anytown System para las 09:00 hrs.

Una vez finalizada la aplicación de la metodología para la red de estudio, en la Figura 40 se presentan los nuevos resultantes de presión obtenidos a partir de la simulación hidráulica del modelo matemático modificado de la red para el instante 09:00 hrs, donde se incorporan los dispositivos de RE en forma de válvulas de rotura de carga (PBV).

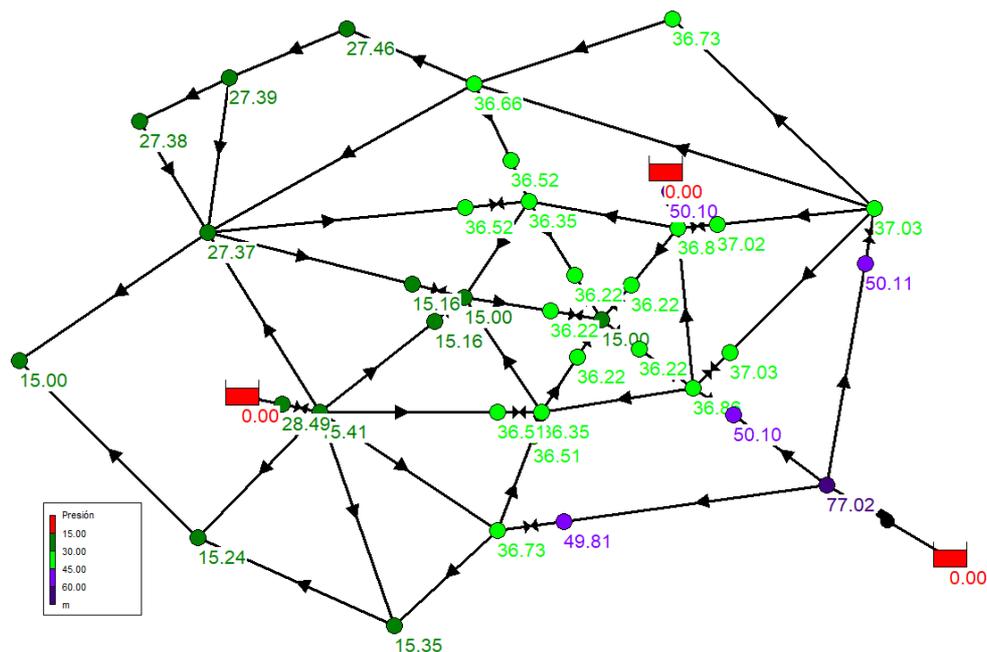


Figura 40. Resultante de presiones y caudales circulantes de la red Anytown System para las 09:00 hrs una vez instalados los RE.

De la solución obtenida, se puede identificar una clara disminución en el valor de las presiones resultantes en los nodos de consumo de la red respecto de los valores iniciales, atendiendo a la reducción del exceso de presión mediante los RE instalados ajustándolos a en la mayor medida de lo posible a la presión de consigna de la red.

En la Tabla 7 se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología de cálculo del PREI para cada uno de los periodos de simulación que incorpora el modelo matemático inicial de la red Anytown System, incluyendo como parámetros de comparación la energía suministrada, la energía mínima requerida, la energía almacenada, la energía

recuperada, el número de iteraciones requeridas para la solución, el número de dispositivos instalados de recuperación energética y el propio valor del PREI.

Tabla 7. Resultados de la aplicación del PREI para la red Anytown System.

Instante	PREI			Potencia (kW)					
	Iter.	Nº Disp. RE	Valor	Suministrada Depósitos	Suministrada Embalses	Suministrada Bombas	Mínima Requerida	Almacenada Depósitos	Recuperada Válvulas
00:00	3	15	1.2577	0.00	33.53	209.02	97.45	0.00	37.39
01:00	3	15	1.2577	0.00	33.53	209.02	97.45	0.00	37.39
02:00	3	15	1.2577	0.00	33.53	209.02	97.45	0.00	37.39
03:00	2	11	1.2254	0.00	18.34	207.82	83.53	0.00	32.15
04:00	2	11	1.2254	0.00	18.34	207.82	83.53	0.00	32.15
05:00	2	11	1.2254	0.00	18.34	207.82	83.53	0.00	32.15
06:00	3	16	1.3849	0.00	144.11	215.10	167.06	0.00	73.96
07:00	3	16	1.3849	0.00	144.11	215.10	167.06	0.00	73.96
08:00	3	16	1.3849	0.00	144.11	215.10	167.06	0.00	73.96
09:00	3	18	1.3901	0.00	168.65	216.31	180.98	0.00	79.57
10:00	3	18	1.3901	0.00	168.65	216.31	180.98	0.00	79.57
11:00	3	18	1.3901	0.00	168.65	216.31	180.98	0.00	79.57
12:00	3	16	1.3849	0.00	144.11	215.10	167.06	0.00	73.96
13:00	3	16	1.3849	0.00	144.11	215.10	167.06	0.00	73.96
14:00	3	16	1.3849	0.00	144.11	215.10	167.06	0.00	73.96
15:00	3	16	1.3792	0.00	119.56	213.87	153.13	0.00	68.38
16:00	3	16	1.3792	0.00	119.56	213.87	153.13	0.00	68.38
17:00	3	16	1.3792	0.00	119.56	213.87	153.13	0.00	68.38
18:00	3	16	1.3719	0.00	95.01	212.65	139.21	0.00	62.64
19:00	3	16	1.3719	0.00	95.01	212.65	139.21	0.00	62.64
20:00	3	16	1.3719	0.00	95.01	212.65	139.21	0.00	62.64
21:00	3	16	1.3625	0.00	70.44	211.43	125.29	0.00	56.76
22:00	3	16	1.3625	0.00	70.44	211.43	125.29	0.00	56.76
23:00	3	16	1.3625	0.00	70.44	211.43	125.29	0.00	56.76
00:00	3	15	1.2577	0.00	33.52	209.02	97.45	0.00	37.39

Con el objetivo de visualizar la variabilidad de la resiliencia de la red mediante la aplicación del PREI como indicador, en la Figura 41 se representa la evolución del PREI a través del tiempo junto con el valor del PREI global calculado para la red Anytown System. Este parámetro se obtiene al extender el análisis del PREI para el periodo de simulación completo, llevando a cabo el análisis dinámico de la red. El procedimiento asociado al cálculo de esta medida de evaluación se integra dentro del propio algoritmo y forma parte del modelo informático desarrollado.

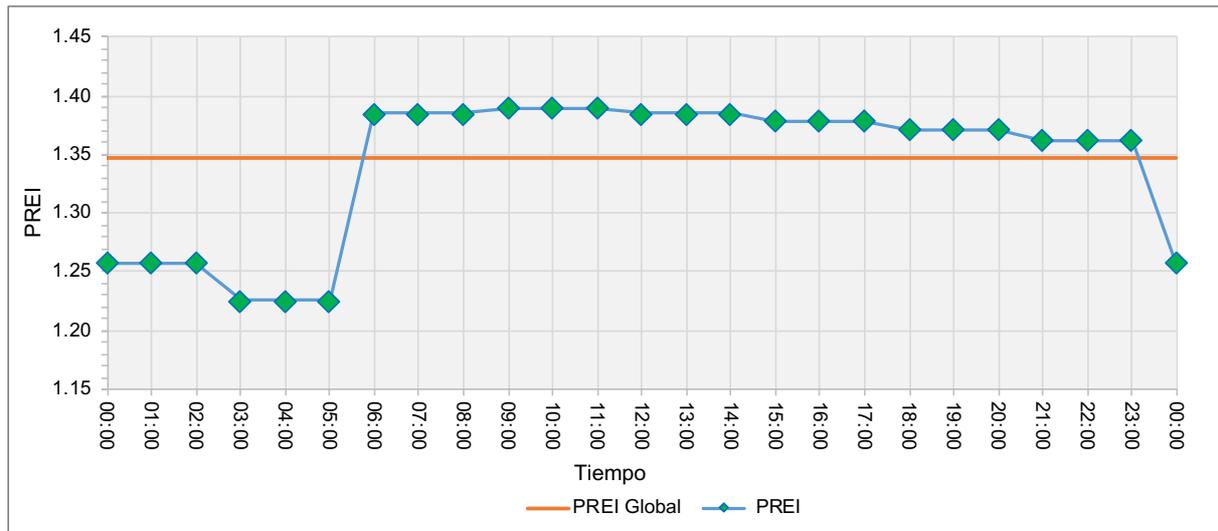


Figura 41. Evolución temporal del PREI para la red Anytown System.

En la Figura 42 se realiza una comparativa entre el consumo energético de la red para condiciones normales de funcionamiento y los resultados obtenidos tras la aplicación de la metodología de cálculo del PREI para la red Anytown System. La diferencia que se obtiene entre las gráficas de evolución representa la cantidad de energía que puede ser recuperada a través de la red si se instalan dispositivos de RE en las tuberías seleccionadas del sistema.

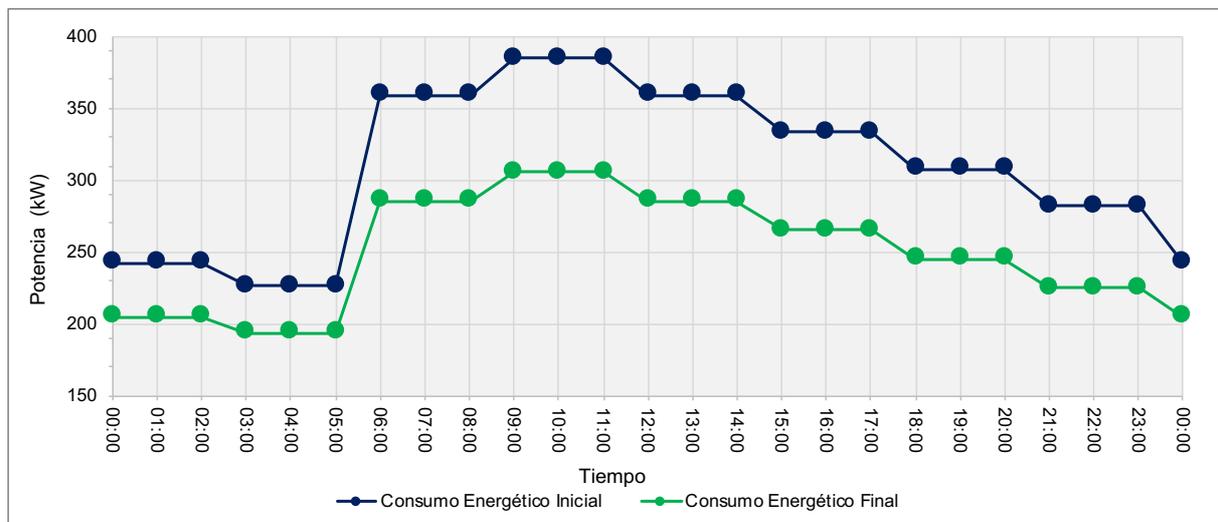


Figura 42. Análisis energético de la aplicación de recuperadores de energía en la red Anytown System.

La aplicación de esta metodología en la red Anytown System supone un total de 72 iteraciones como las planteadas para el instante 9:00 hrs, proponiendo de esta manera la instalación de un mínimo de 18 dispositivos de RE en diferentes ubicaciones de la red. No obstante, la instalación de todos estos dispositivos no implica su facilidad de operación y por consiguiente su rentabilidad. Sin embargo, brindan la posibilidad de cuantificar de manera más precisa la máxima cantidad de energía que puede ser recuperada exclusivamente a partir de la red. Cabe destacar, que el resto de la energía que se encuentra disponible en la red

representada a través del exceso de presión únicamente puede ser recuperada por los usuarios del sistema, por lo cual no puede ser identificada como EPR de la red.

Si se realiza un análisis de capacidad de RE se puede determinar la cantidad adecuada de dispositivos a instalar para obtener la mayor capacidad de RE de la red. En la Figura 43 se presenta la energía recuperada acumulada en función del número de dispositivos instalados, atendiendo a criterios de instalación de mayor a menor capacidad de energía recuperada.

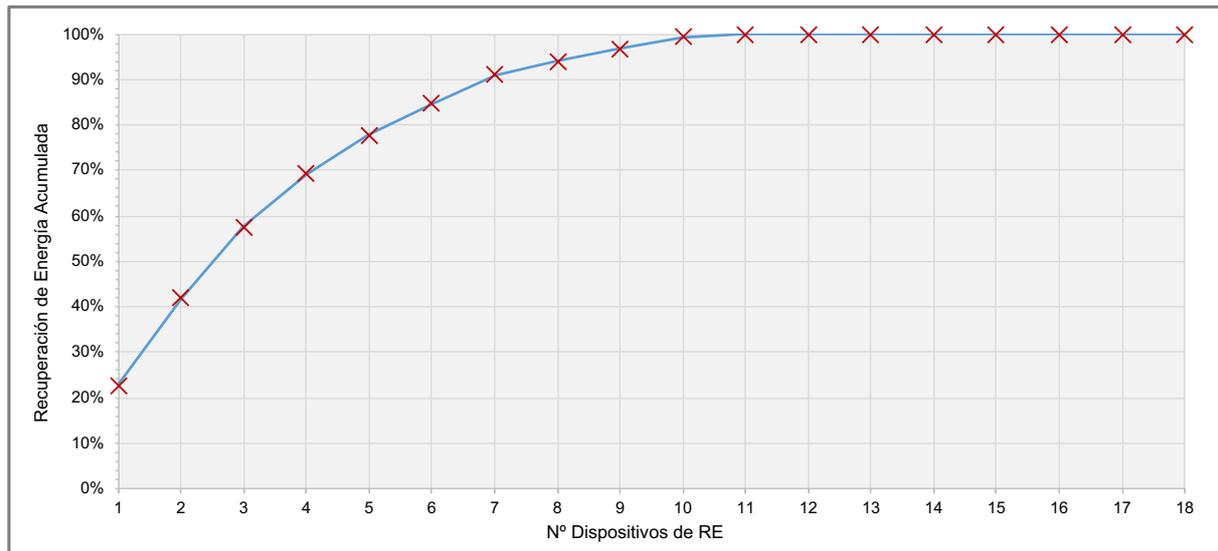


Figura 43. Distribución estadística de los recuperadores de energía en la red Anytown System.

De la Figura 43, se observa que la instalación de tan solo 5 dispositivos en la red representa un porcentaje superior al 70% de la EPR total del sistema. Así mismo el número de dispositivos a instalar en la red se reduce considerablemente facilitando su operación y por consiguiente su rentabilidad.

A diferencia de la metodología propuesta para el cálculo del PREI donde se obtiene una solución particular para cada instante de análisis, para conseguir una solución general para la red Anytown System que cumpla con el objetivo de recuperar el mayor porcentaje de la EPR_R , se debe llevar a cabo un análisis de coincidencia de los dispositivos instalados en cada una de las tuberías de la red. De esta manera, aquellos dispositivos de RE seleccionados representados en forma de PBVs deben poseer una consigna variable, ajustando este parámetro para cada periodo de análisis con el objetivo de cumplir con la hipótesis de no alterar los caudales circulantes a través de la red.

A partir de la selección de dispositivos a instalar para conseguir una recuperación energética técnicamente factible, en la Figura 44 se presenta el modelo matemático de la red Anytown System el cual incorpora dentro de estructura los dispositivos de RE atendiendo a criterios de mayor capacidad de potencia.

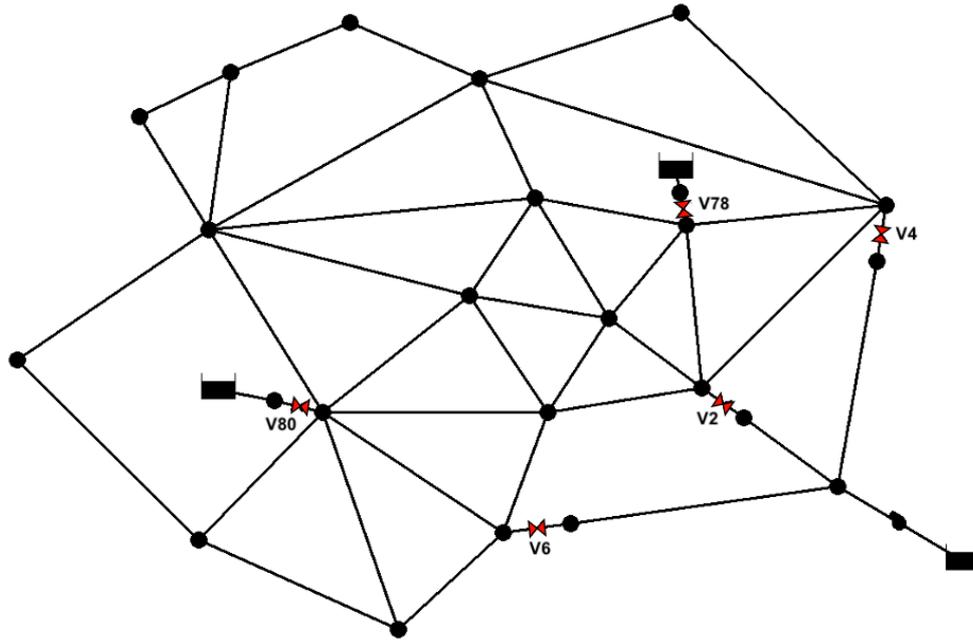


Figura 44. Modelo matemático resultante de la red Anytown System.

Tomando como base el nuevo modelo matemático obtenido para la red Anytown System y partiendo de la solución planteada, en la Figura 45 se presenta las curvas de recuperación energética para cada uno de los dispositivos instalados en el sistema.

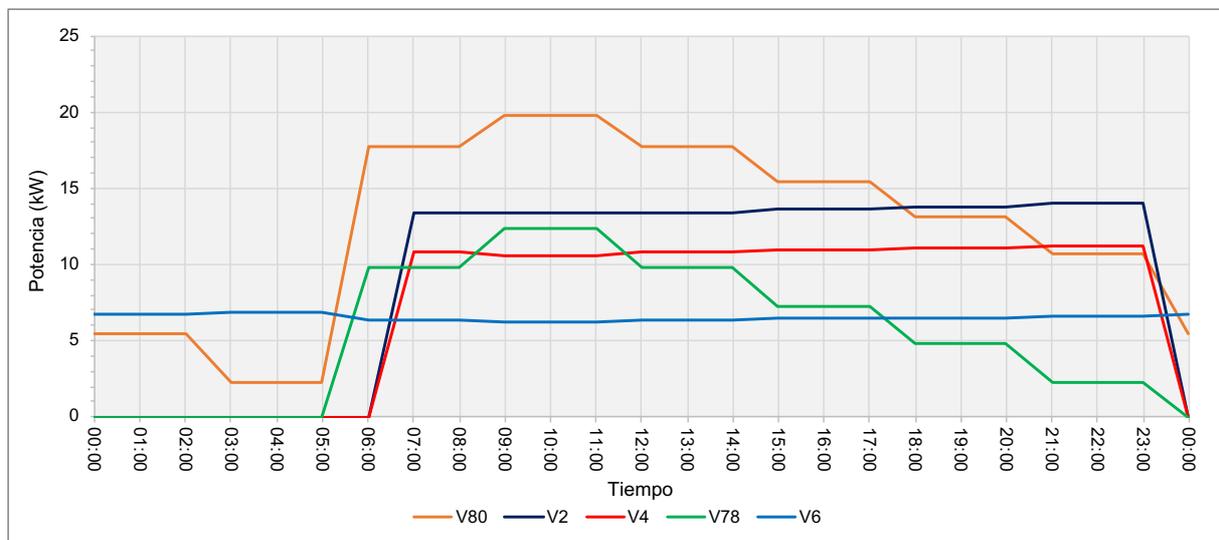


Figura 45. Gráfica de recuperación energética para los dispositivos instalados en la red Anytown System.

Para efecto de visualizar la propuesta de solución planteada para la red Anytown System se utilizó el índice de eficiencia energética (IEE) y el índice de recuperación energética (IER), los cuales permiten analizar la energía potencialmente recuperable de la red (EPR_R) respecto de la energía potencialmente recuperable por los usuarios (ERP_U). Estos índices brindan una visión general de la capacidad del sistema y de la solución obtenida a partir de la aplicación de la metodología asociada al cálculo del PREI. En la Tabla 8 se presenta el análisis

energético de la red el cual considera los 5 escenarios diferentes en base al número de dispositivos de RE instalados en la red.

Tabla 8. Indicadores de energía de la red Anytown System para las diferentes combinaciones de dispositivos instalados.

Nº Disp. RE	0	1	2	3	4	5
ER (kWh)	0	311.78	542.94	728.48	891.44	1030.25
EPR (kWh)	4289.10	3977.32	3746.16	3560.62	3397.65	3258.85
EPRn (kWh)	1491.80	1180.02	948.86	763.32	600.36	461.55
EPRu (kWh)	2797.30	2797.30	2797.30	2797.30	2797.30	2797.30
IEE	44.50%	48.53%	51.52%	53.92%	56.03%	57.83%
IER	0.00%	20.90%	36.39%	48.83%	59.76%	69.06%

De los resultados presentados en la Tabla 8, se puede observar que en el caso de no realizar la instalación de ningún dispositivo de RE el IEE para la red es de 44.50% mientras que obviamente IER es equivalente a 0%. Por otra parte, en el caso de instalar 5 dispositivos de RE con mayor capacidad de potencia el IEE alcanza un valor de 57.83% mientras que el IER llega hasta el 69.06%.

4.5.2 Aplicación del PREI a la red Network 3

Para la aplicación del PREI a la red Network 3 se realiza el mismo procedimiento utilizado para la red Anytown System, estableciéndose como primer punto el valor de la presión mínima requerida para los nudos de consumo de la red, para este caso correspondiente a 25 psi. En la Figura 46 se presentan los resultados correspondientes a la simulación hidráulica para el instante 23:00 hrs bajo condiciones normales de funcionamiento.

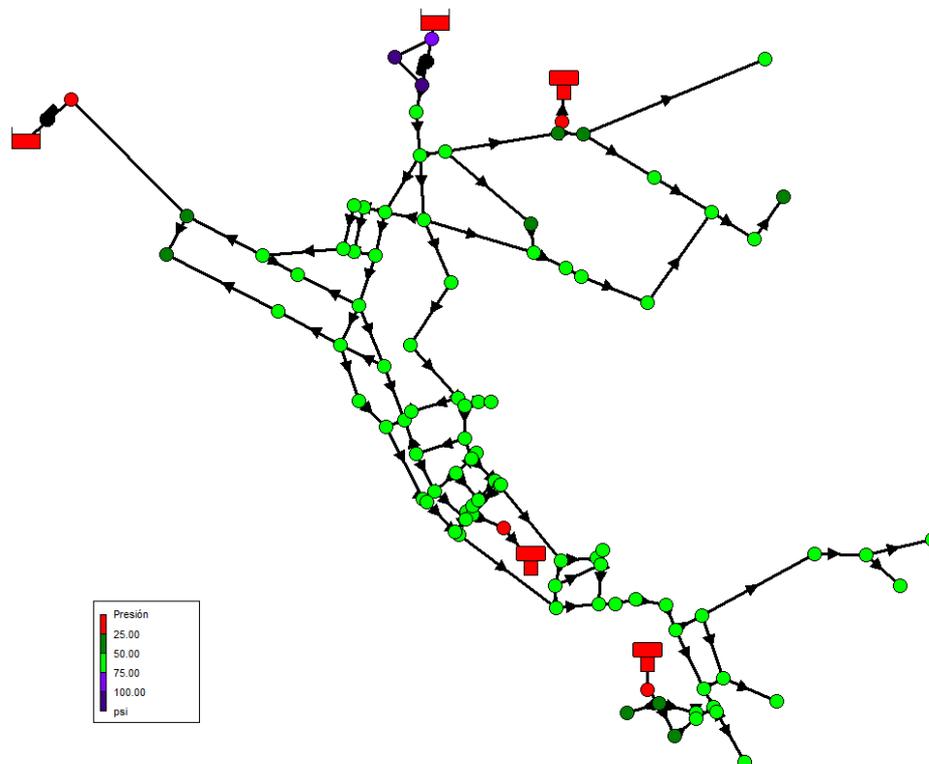


Figura 46. Resultante de presiones y caudales circulantes de la red Network 3 para las 23:00 hrs.

Al analizar los resultados de la simulación hidráulica, se observa que los nudos de consumo de la red presentan un exceso de presión sobre el valor de presión mínima requerida, con valores que superan los 37.82 psi, lo cual aporta una recuperación de energía en forma de presión de al menos 12.82 psi.

Es necesario indicar que dentro de los resultados de la simulación hidráulica para el instante 23:00 hrs se puede identificar la presencia de nudos de consumo donde la presión es inferior a la mínima requerida. Esto se observa principalmente en aquellas conexiones o nudos cuya demanda base es igual a cero y que se ubican a la entrada de un depósito o de una bomba y funcionan como punto de conexión con este tipo de elementos. En la Figura 47 se presenta el esquema de resolución resumido para la red Network 3 para el instante 23:00 hrs.

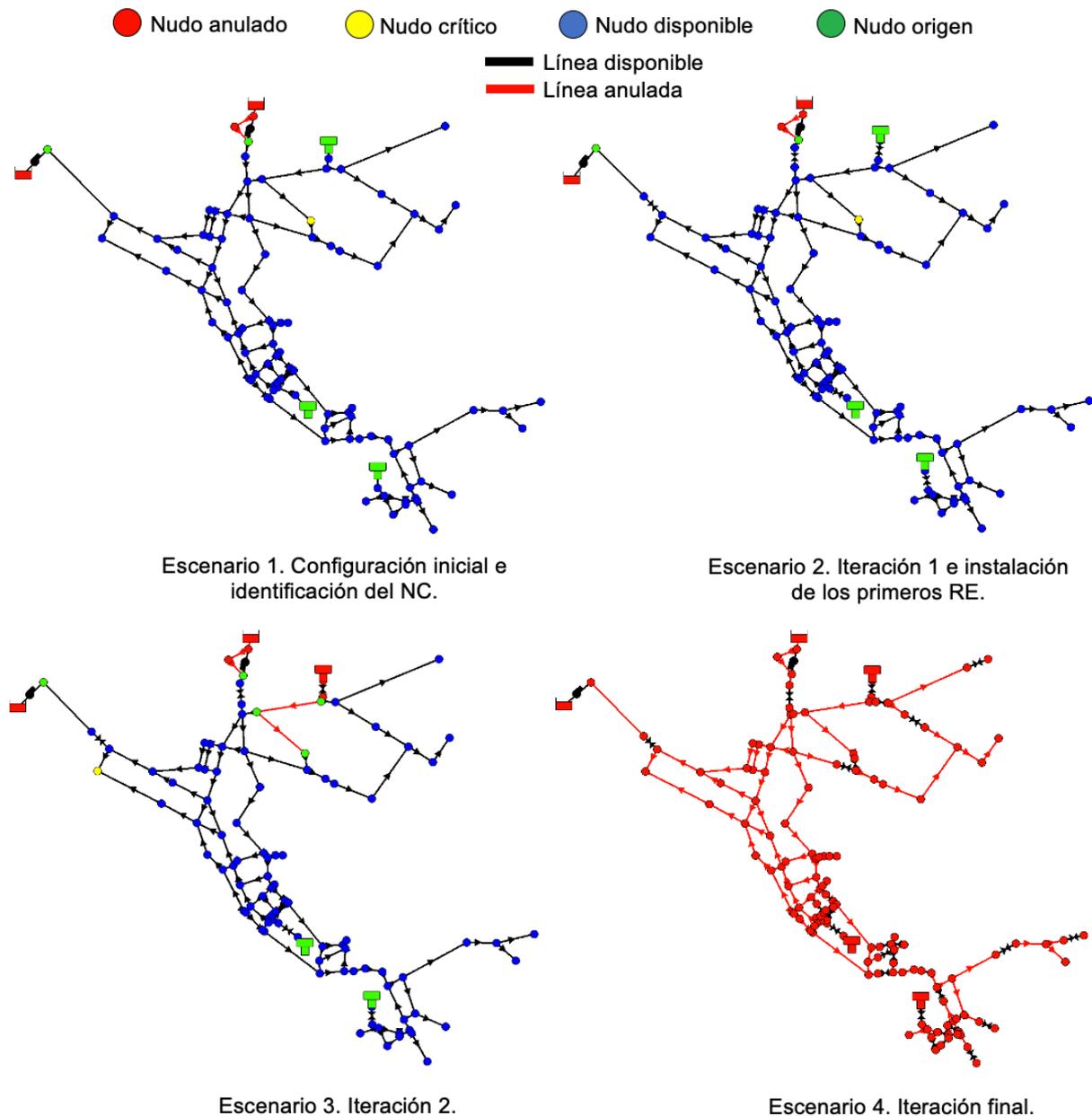


Figura 47. Resolución de la red Network 3 para las 23:00 hrs.

Una vez finalizada la aplicación de la metodología para la red de estudio, en la Figura 48 se presentan los nuevos resultantes de presión obtenidos a partir de la simulación hidráulica del modelo matemático modificado de la red para el instante 23:00 hrs, donde se incorporan los dispositivos de RE en forma de PBVs.

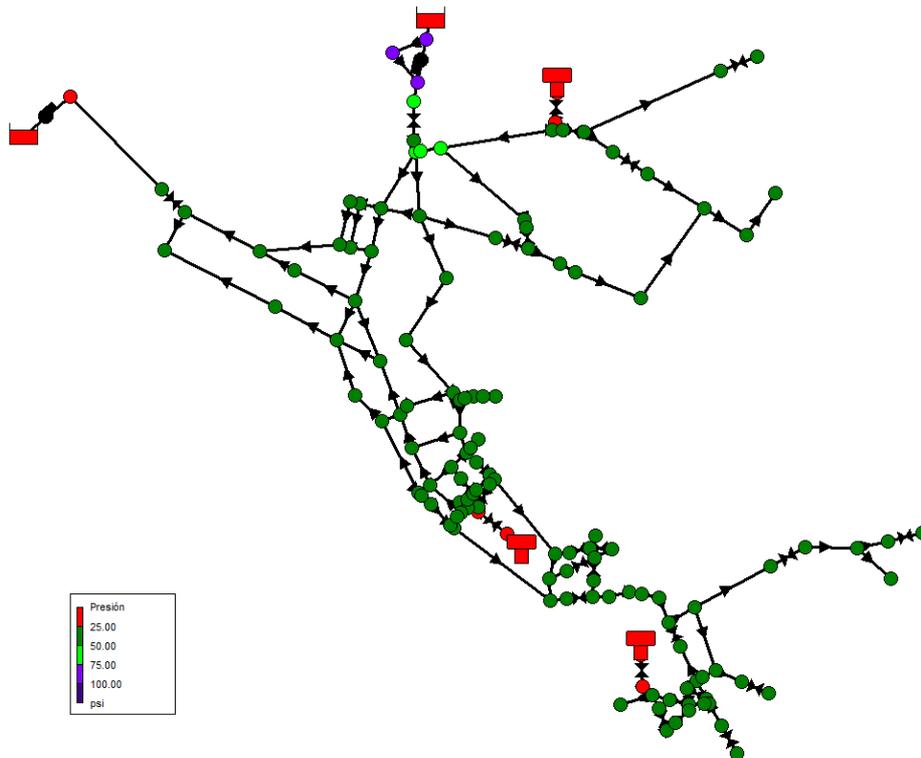


Figura 48. Resultante de presiones y caudales circulantes de la red Network 3 para las 23:00 hrs posterior a la aplicación del PREI una vez instalados los RE.

De la solución obtenida, y al analizar los resultados de la simulación hidráulica, se puede identificar una clara disminución en el valor de las presiones resultantes en los nudos de consumo de la red respecto de los valores iniciales, atendiendo a la reducción del exceso de presión mediante los RE instalados. Además, se puede apreciar que aquellos nudos identificados en el escenario original cuya presión es inferior a la mínima requerida se mantienen constantes tras la aplicación de esta metodología para la red Network 3.

En la Tabla 9 se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología de cálculo del PREI para cada uno de los periodos de simulación que incorpora el modelo matemático inicial correspondiente a la red Network 3, en donde se incluyen como parámetros de comparación la energía suministrada, la energía mínima requerida, la energía almacenada, la energía recuperada, el número de iteraciones requeridas para la solución, el número de dispositivos instalados de recuperación energética y el propio valor del PREI.

Tabla 9. Resultados de la aplicación del PREI para la red Network 3.

Instante	PREI			Potencia (kW)					
	Iter.	Nº Disp. RE	Valor	Suministrada Depósitos	Suministrada Embalses	Suministrada Bombas	Mínima Requerida	Almacenada Depósitos	Recuperada Válvulas
00:00	21	37	1.1727	10.44	655.81	278.55	88.41	0.00	147.90
01:00	20	36	1.2246	35.29	656.57	278.47	107.18	80.62	175.75
02:00	18	32	1.1871	5.87	655.00	278.63	93.07	54.00	148.29
03:00	17	29	1.1916	3.69	654.11	278.72	92.92	72.62	147.73
04:00	15	18	1.1675	0.00	650.56	279.07	73.25	69.44	131.79
05:00	16	19	1.1884	0.00	653.36	278.80	85.08	133.35	134.49
06:00	14	16	1.1499	0.00	759.10	335.24	72.67	82.32	140.85
07:00	11	11	1.1748	0.00	758.28	335.48	75.28	238.95	136.27
08:00	13	16	1.3210	0.00	492.22	55.59	72.01	49.63	136.80
09:00	13	18	1.2919	39.90	508.79	55.92	91.42	43.15	137.20
10:00	13	18	1.2780	31.12	509.49	55.91	90.54	13.07	137.04
11:00	14	20	1.2787	43.96	511.89	56.02	97.93	3.92	142.15
12:00	14	20	1.2764	37.63	512.98	56.02	96.70	1.34	140.58
13:00	14	19	1.2748	27.76	513.51	55.97	93.60	1.55	137.98
14:00	14	19	1.2734	16.32	513.41	55.88	89.05	4.09	134.62
15:00	15	21	1.2799	3.28	513.00	55.76	84.75	10.64	133.40
16:00	13	18	1.2700	0.00	512.34	55.71	78.99	13.66	128.34
17:00	13	18	1.2787	0.00	511.16	55.65	77.58	27.26	128.73
18:00	13	19	1.2805	0.00	509.30	55.52	74.62	31.59	128.62
19:00	13	19	1.2892	0.00	508.10	55.49	74.63	41.40	129.45
20:00	19	31	1.3642	93.51	390.59	0.00	80.42	0.00	147.03
21:00	21	34	1.3612	103.34	393.62	0.00	83.71	0.00	149.25
22:00	23	40	1.3555	146.38	400.18	0.00	97.60	0.00	159.60
23:00	22	37	1.3971	186.55	408.49	0.00	110.42	0.00	192.47
00:00	22	39	1.3803	96.66	399.87	0.00	88.41	0.00	155.21

Con el objetivo de visualizar la variabilidad de la resiliencia de la red mediante la aplicación del PREI como indicador, en la Figura 49 se representa la evolución del PREI a través del tiempo junto con el valor del PREI global calculado para la red Network 3.

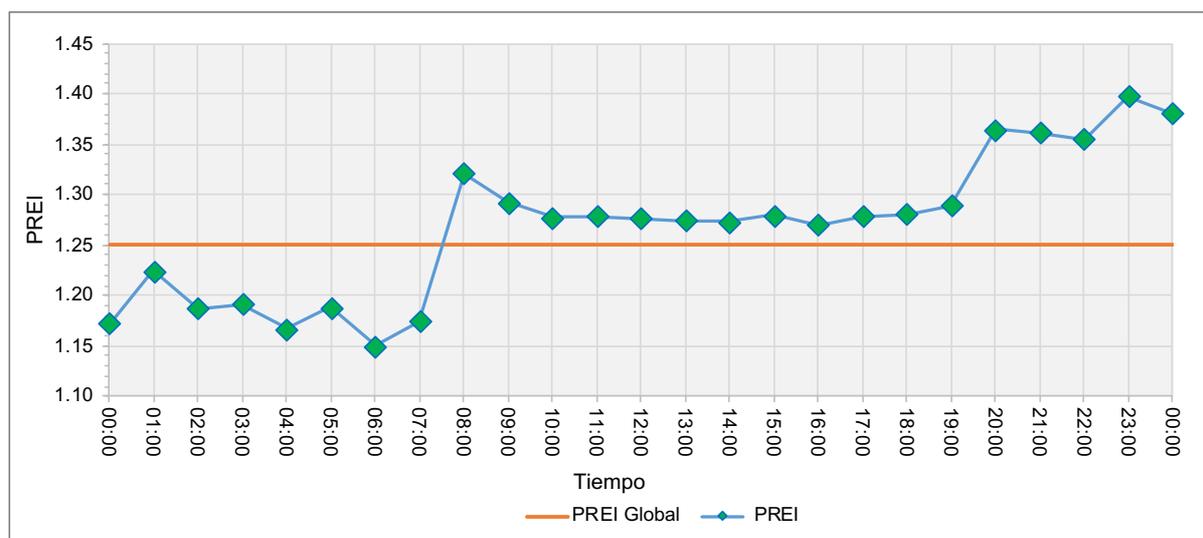


Figura 49. Evolución temporal del PREI para la red Network 3.

En la Figura 50 se realiza la comparativa entre el consumo energético de la red para condiciones normales de funcionamiento y los resultados obtenidos tras la aplicación de la metodología de cálculo del PREI para la red Network 3.

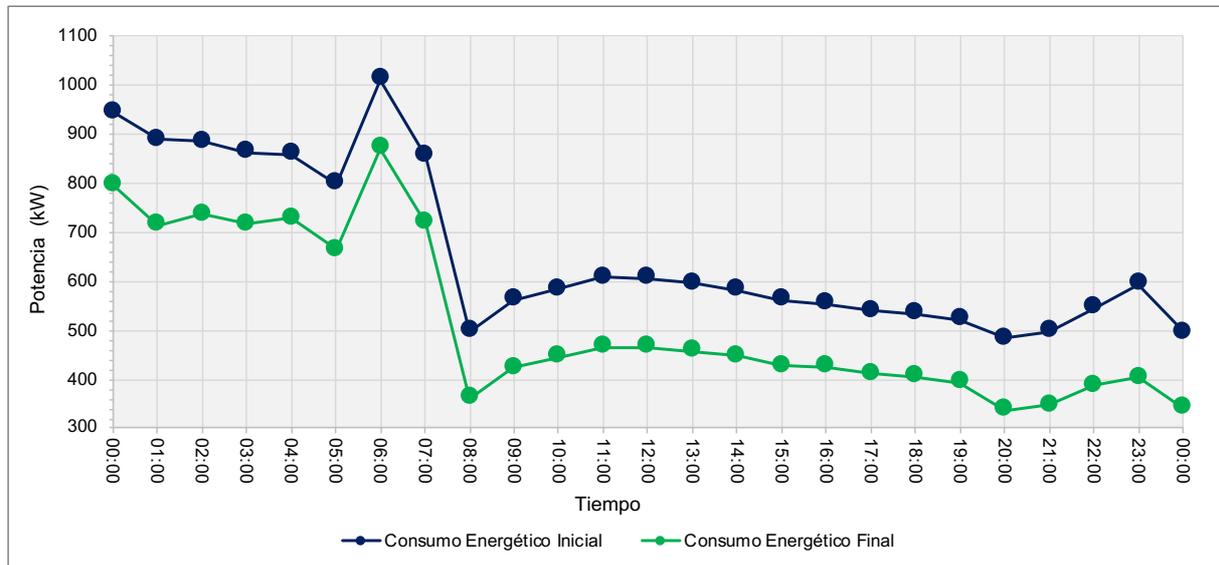


Figura 50. Análisis energético de la aplicación de recuperadores de energía en la red Network 3.

La aplicación de esta metodología en la red Network 3 supone un total de 402 iteraciones como las planteadas para el instante 23:00 hrs, proponiendo de esta manera la instalación de un mínimo de 40 dispositivos de RE en diferentes ubicaciones de la red.

Si se realiza un análisis de capacidad de RE se puede determinar la cantidad adecuada de dispositivos a instalar para obtener la mayor capacidad de RE de la red. Por lo cual, en la Figura 51 se presenta la energía recuperada acumulada en función del número de dispositivos instalados, atendiendo a criterios de instalación de mayor a menor capacidad de energía recuperada.

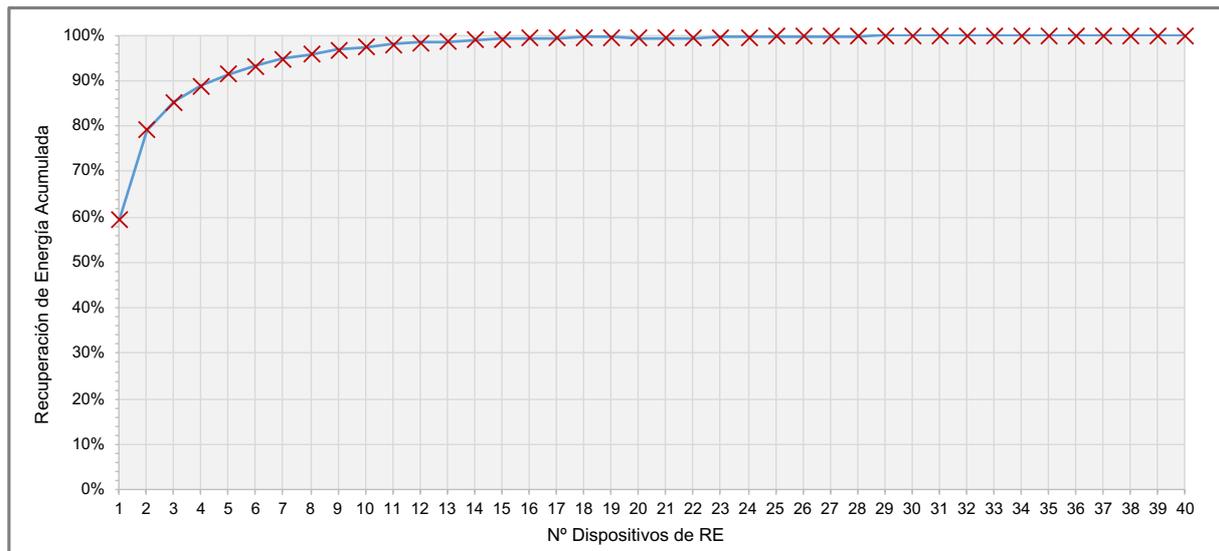


Figura 51. Distribución estadística de los recuperadores de energía en la red Network 3.

A partir de la Figura 51 se puede observar que la instalación de tan solo 2 dispositivos en la red representa un porcentaje superior al 70% de la EPR total del sistema. Así mismo el número de dispositivos a instalar en la red se reduce considerablemente facilitando su operación y por consiguiente su rentabilidad. En la Figura 52 se presenta el modelo matemático de la red Network 3 el cual incorpora dentro de la estructura los 2 dispositivos de RE previamente seleccionados atendiendo a criterios de mayor capacidad de potencia.

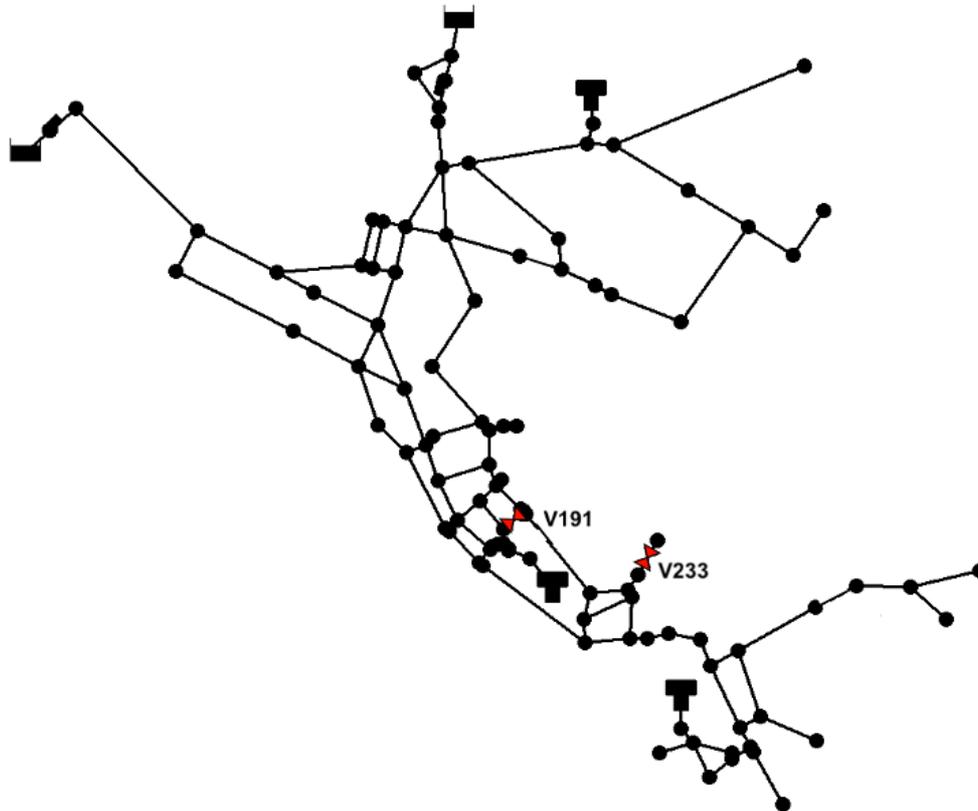


Figura 52. Modelo matemático resultante de la red Network 3.

Cabe señalar en un principio, que la metodología asociada al cálculo del PREI entrega como resultado una solución particular para cada uno de los instantes de análisis, de esta manera obteniendo una solución la cual es capaz de recuperar el máximo de EPR_R . Dentro de esta solución la ubicación de las válvulas que representan los dispositivos de RE no siempre coincide entre un instante y otro, puesto que a lo largo de una simulación extendida los caudales y las presiones son variables a lo largo del tiempo. Por ende, determinar una solución general para el sistema bajo un estándar de eficiencia requiere de un proceso analítico y extensivo, donde se evalúe la coincidencia y la repetitividad de la válvulas en cada una de las tuberías de la red.

Tomando como base el nuevo modelo matemático obtenido para la red Network 3 y partiendo de la solución planteada, en la Figura 53 se presenta las curvas de recuperación energética para cada uno de los dispositivos instalados en el sistema.

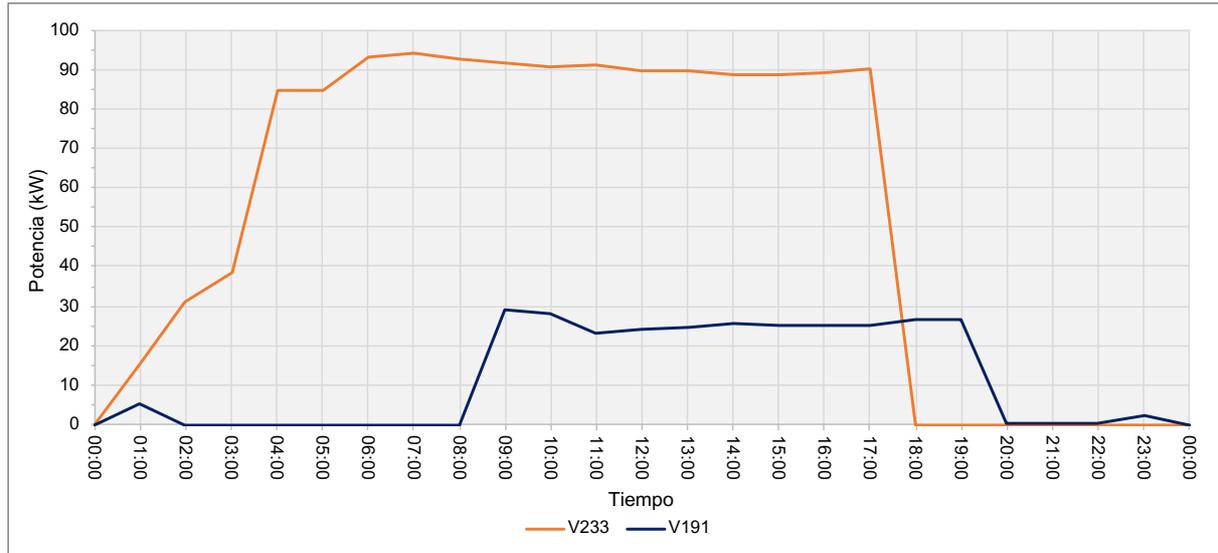


Figura 53. Gráfica de recuperación energética para los dispositivos instalados en la red Network 3.

Para efecto de visualizar la propuesta de solución planteada para la red Network 3 se utilizó el IEE y el IER, los cuales permiten analizar la EPR_R respecto de la EPR_u . En la Tabla 10 se presenta el análisis energético de la red el cual considera los 2 escenarios diferentes en base al número de dispositivos de RE instalados en la red.

Tabla 10. Indicadores de energía de la red Network 3 para las diferentes combinaciones de dispositivos instalados.

Nº Disp. RE	0	1	2
ER (kWh)	0.00	1342.45	1634.95
EPR (kWh)	15275.58	13933.13	13640.64
EPRn (kWh)	3581.55	2239.10	1946.61
EPRu (kWh)	11694.03	11694.03	11694.03
IEE	17.06%	24.35%	25.94%
IER	0.00%	37.48%	45.65%

En función del criterio de selección, se puede observar que en el caso de no realizar la instalación de ningún dispositivo de RE el IEE para la red es de 17.06% mientras que obviamente IER es equivalente a 0%. Por otra parte, en el caso de instalar 2 dispositivos de RE con mayor capacidad de potencia el IEE alcanza un valor de 25.94% mientras que el IER llega hasta el 45.65%.

4.5.3 Aplicación del PREI a la red C-Town

Para la aplicación del PREI a la red C-Town se realiza el mismo procedimiento utilizado para las redes Anytown System y Network 3, estableciéndose como primer punto el valor de la presión mínima requerida para los nudos de consumo de la red, para este caso correspondiente a 20 mca. En la Figura 54 se presentan los resultados correspondientes a la simulación hidráulica para el instante 08:00 hrs bajo condiciones normales de funcionamiento.

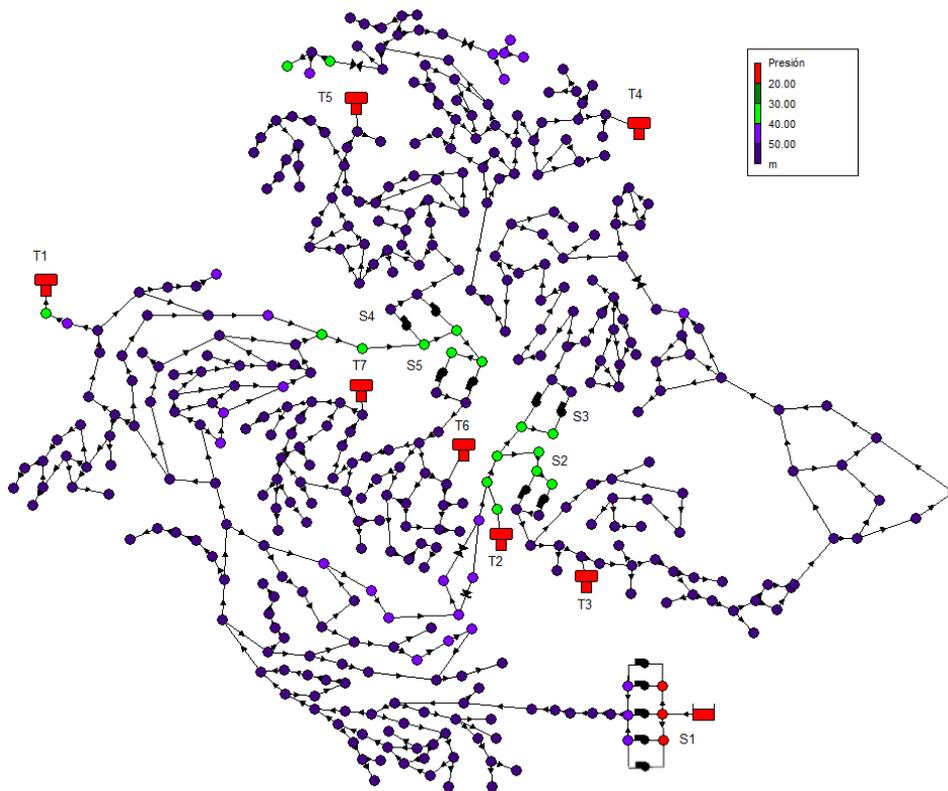


Figura 54. Resultante de presiones y caudales circulantes de la red C-Town para las 08:00 hrs.

Como el objetivo principal de la metodología propuesta consiste en evaluar la EPR de los SDA, previo a la aplicación del PREI sobre el modelo matemático de la red se debe prestar atención a ciertas consideraciones. Es sabido que en los SDA las válvulas se consideran elementos fundamentales dentro de la estructura de regulación del sistema, por lo tanto, la manipulación de éstas puede provocar la reestructuración de la propia red, influyendo directamente sobre las presiones resultantes en los nudos y en los caudales circulantes.

Para el caso de estudio de la red C-Town donde se observa la presencia de válvulas reductoras de presión (PRV) en diversos puntos del sistema, se optó por dar apertura a todas aquellas válvulas que se encontraban regulando la red, pasando éstas a ser consideradas como tuberías, logrando con ello una simplificación en el análisis del sistema. Cabe señalar, que la introducción de una PBV en serie a una PRV que se encuentra regulando provoca errores en el cálculo hidráulico de la red, además de contradecir directamente la hipótesis que formula la metodología en cuanto a la recuperación del exceso de presión.

A partir de los resultados de la simulación hidráulica para el instante 08:00 hrs, se obtiene que los nudos de consumo de la red presentan un exceso de presión sobre el valor de presión mínima requerida, con valores que superan los 31.36 metros, lo cual aporta una recuperación de energía en forma de presión de al menos 11.36 metros. En la Figura 55 se presenta el esquema de resolución resumido para la red C-Town.

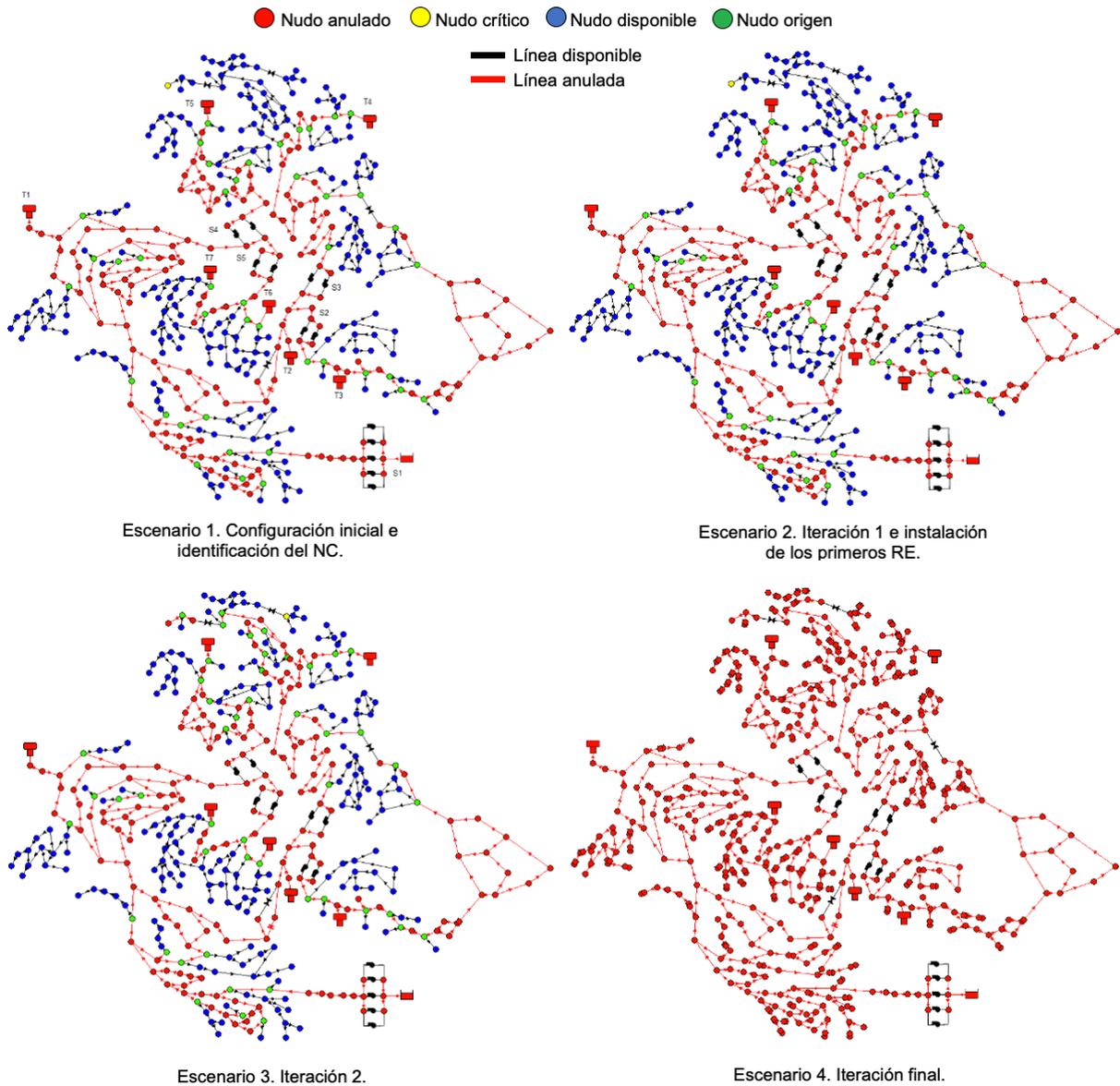


Figura 55. Resolución de la red C-Town para las 08:00 hrs.

Tras la aplicación de la metodología para la red de estudio, en la Figura 56 se presentan los nuevos resultantes de presión obtenidos a partir de la simulación hidráulica del modelo matemático modificado de la red para el instante 08:00 hrs, donde se incorporan los dispositivos de RE en forma de PBVs.

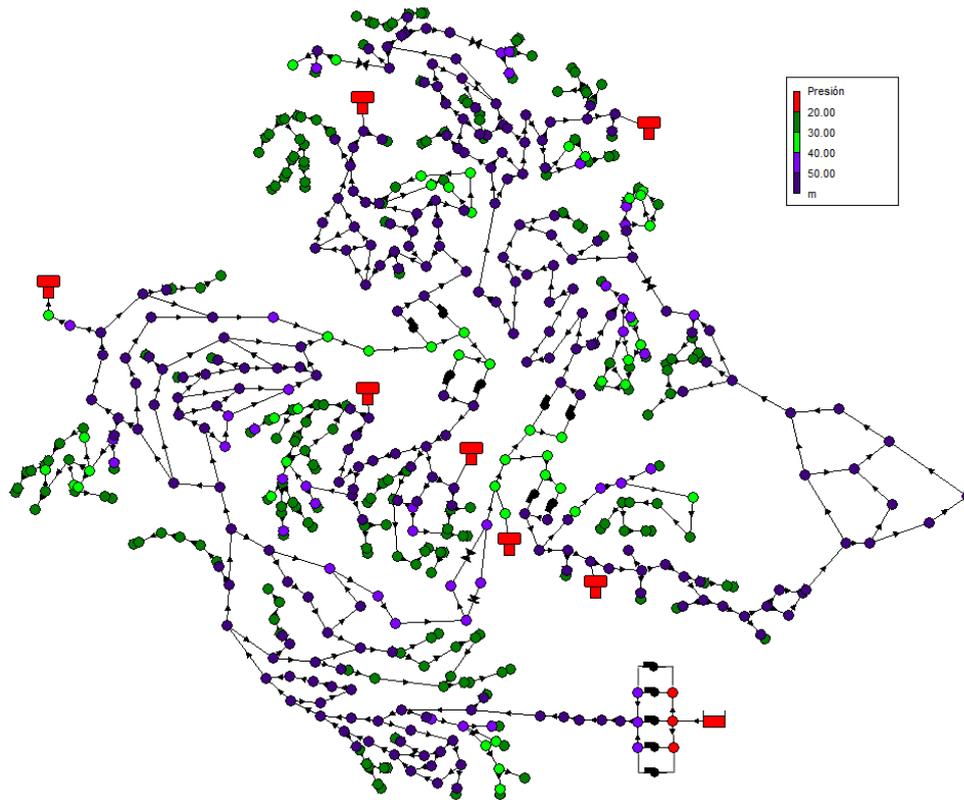


Figura 56. Resultante de presiones y caudales de la red C-Town para las 08:00 hrs posterior a la aplicación del PREI una vez instalados los RE.

Para visualizar la variabilidad de la resiliencia de la red mediante la aplicación del PREI como indicador, en la Figura 57 se representa la evolución del PREI a través del tiempo junto con el valor del PREI global calculado para la red C-Town.

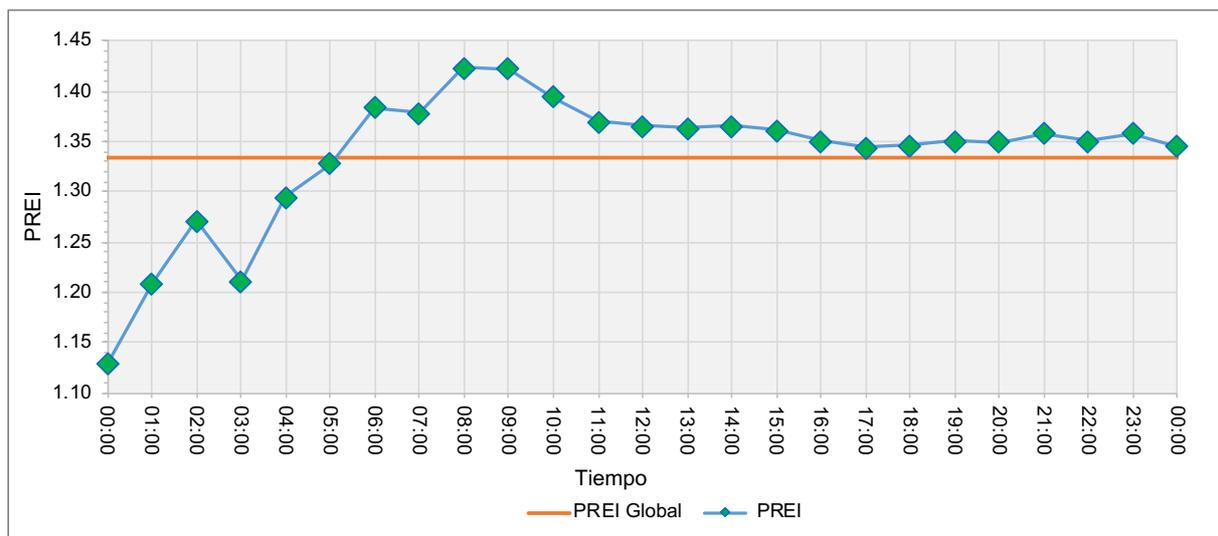


Figura 57. Evolución temporal del PREI para la red C-Town.

En la Tabla 11 se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología de cálculo del PREI para cada uno de los periodos de simulación que incorpora el modelo matemático inicial correspondiente a la red C-Town, en donde se incluyen como parámetros

de comparación la energía suministrada, la energía mínima requerida, la energía almacenada, la energía recuperada, el número de iteraciones requeridas para la solución, el número de dispositivos instalados de recuperación energética y el propio valor del PREI.

Tabla 11. Resultados de la aplicación del PREI para la red C-Town.

Instante	PREI			Potencia (kW)					
	Iter.	Nº Disp. RE	Valor	Suministrada Depósitos	Suministrada Embalses	Suministrada Bombas	Mínima Requerida	Almacenada Depósitos	Recuperada Válvulas
00:00	120	136	1.1292	33.77	184.47	323.97	153.04	0.00	50.30
01:00	117	131	1.2095	19.22	182.98	323.42	122.26	201.86	42.21
02:00	116	134	1.2708	1.87	182.25	289.12	116.08	172.47	50.01
03:00	119	139	1.2113	0.00	176.69	224.94	89.39	52.44	54.89
04:00	120	142	1.2949	0.00	173.93	212.07	84.82	106.74	57.35
05:00	120	142	1.3277	0.00	173.65	213.93	87.87	118.69	59.31
06:00	120	142	1.3841	0.00	174.76	233.04	107.45	114.82	71.26
07:00	120	142	1.3787	0.00	169.04	244.15	123.98	70.97	82.65
08:00	120	142	1.4228	0.00	172.57	261.37	145.38	71.94	91.59
09:00	120	142	1.4217	0.00	177.11	277.19	169.64	50.67	98.67
10:00	120	142	1.3941	0.00	178.88	292.49	188.47	24.87	101.68
11:00	120	142	1.3697	0.00	178.55	296.32	192.38	8.52	101.29
12:00	119	141	1.3653	2.24	180.11	291.57	195.05	0.00	101.88
13:00	119	141	1.3634	2.04	179.81	299.55	200.58	0.00	102.04
14:00	120	142	1.3658	0.00	179.68	289.36	189.43	0.00	102.29
15:00	120	142	1.3611	5.40	180.32	302.73	204.43	0.00	102.57
16:00	118	140	1.3510	16.68	181.55	302.10	211.53	0.00	101.36
17:00	118	140	1.3442	14.94	180.94	308.54	214.93	0.00	99.64
18:00	120	142	1.3459	20.52	182.48	308.92	217.51	0.00	101.82
19:00	118	140	1.3500	13.75	181.70	304.13	211.41	0.00	100.87
20:00	119	142	1.3492	23.84	183.68	304.81	219.17	0.00	102.36
21:00	120	142	1.3584	4.33	181.52	302.45	204.94	0.00	101.55
22:00	119	141	1.3500	0.00	179.07	293.17	189.79	0.00	98.86
23:00	120	142	1.3582	0.00	177.72	286.23	176.22	9.62	99.61
00:00	120	142	1.3450	0.00	172.27	264.91	146.47	23.14	92.31

En la Figura 58 se realiza la comparativa entre el consumo energético de la red para condiciones normales de funcionamiento y los resultados obtenidos tras la aplicación de la metodología de cálculo del PREI para la red C-Town. Con ello, se representa la cantidad de energía que puede ser recuperada a través de la red si se instalan dispositivos de RE en las tuberías seleccionadas del sistema.

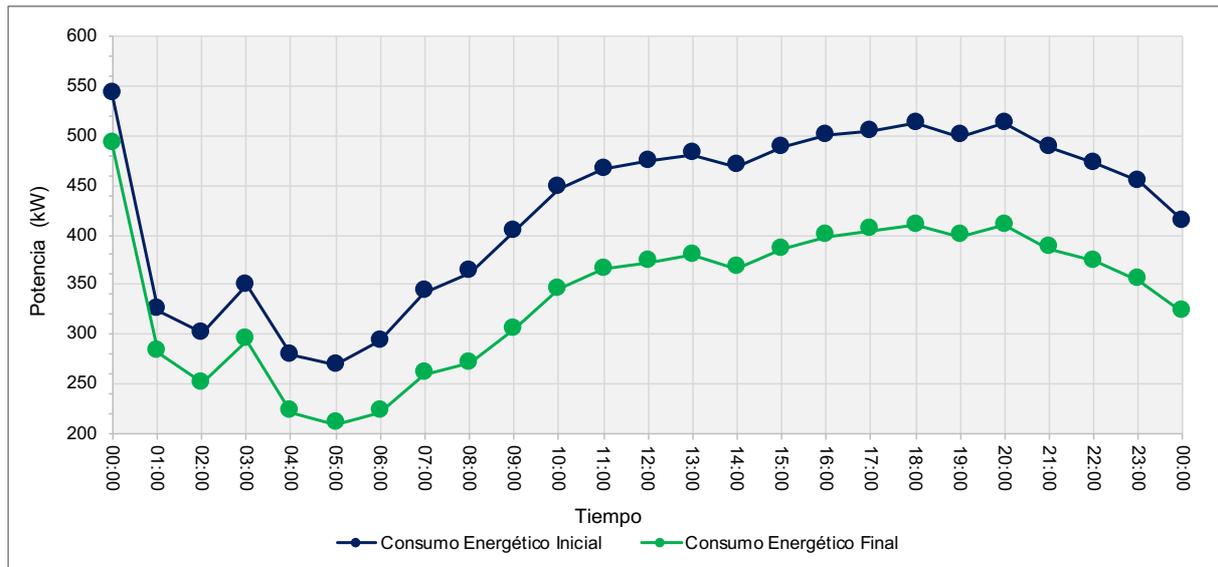


Figura 58. Análisis energético de la aplicación de recuperadores de energía en la red C-Town.

La aplicación de esta metodología en la red C-Town supone un total de 2982 iteraciones como las planteadas para el instante 08:00 hrs, proponiendo de esta manera la instalación de un mínimo de 142 dispositivos de RE en diferentes ubicaciones de la red.

A partir de los resultados presentados, si se lleva a cabo un análisis de capacidad de RE se puede determinar la cantidad adecuada de dispositivos a instalar para obtener la mayor capacidad de RE de la red. En la Figura 59 se presenta la energía recuperada acumulada en función del número de dispositivos instalados, atendiendo a criterios de instalación de mayor a menor capacidad de energía recuperada.

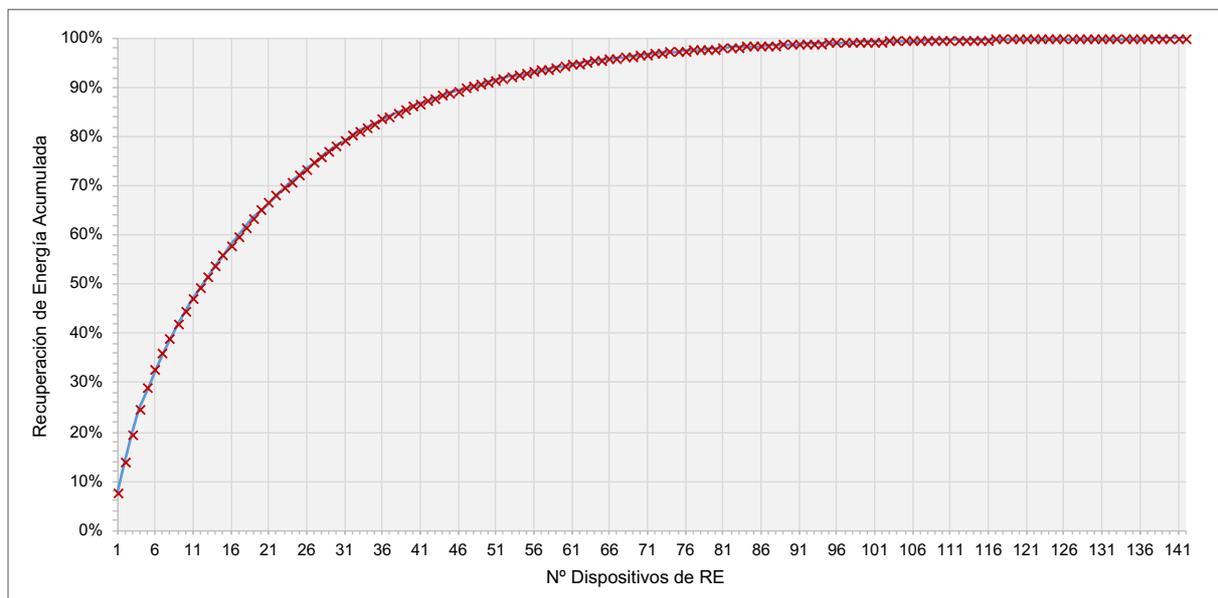


Figura 59. Distribución estadística de los recuperadores de energía en la red C-Town.

De la gráfica presentada se puede observar que la instalación de 26 dispositivos en la red representa un porcentaje superior al 70% de la EPR total del sistema. En la Figura 60 se presenta el modelo matemático de la red C-Town el cual incorpora dentro de estructura los 26

dispositivos de RE previamente seleccionados atendiendo a criterios de mayor capacidad de potencia.

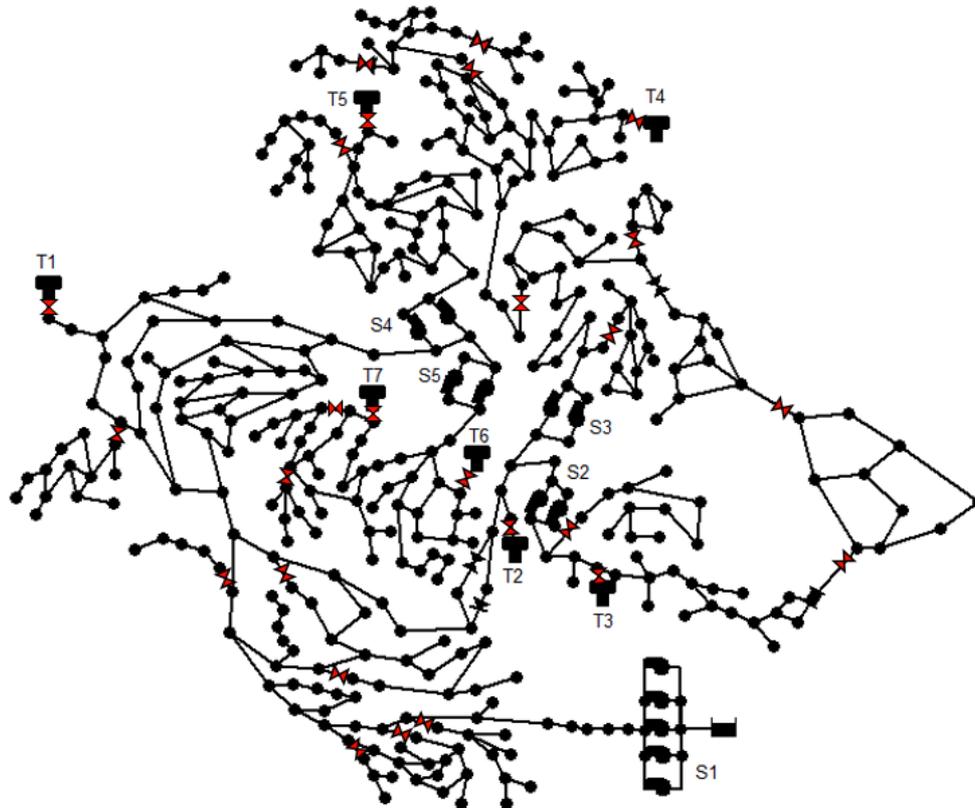


Figura 60. Modelo matemático resultante de la red C-Town.

Tomando como base el nuevo modelo matemático obtenido para la red C-Town y partiendo de la solución planteada, en la Figura 61 se presenta las curvas de recuperación energética para cada uno de los dispositivos instalados en el sistema.

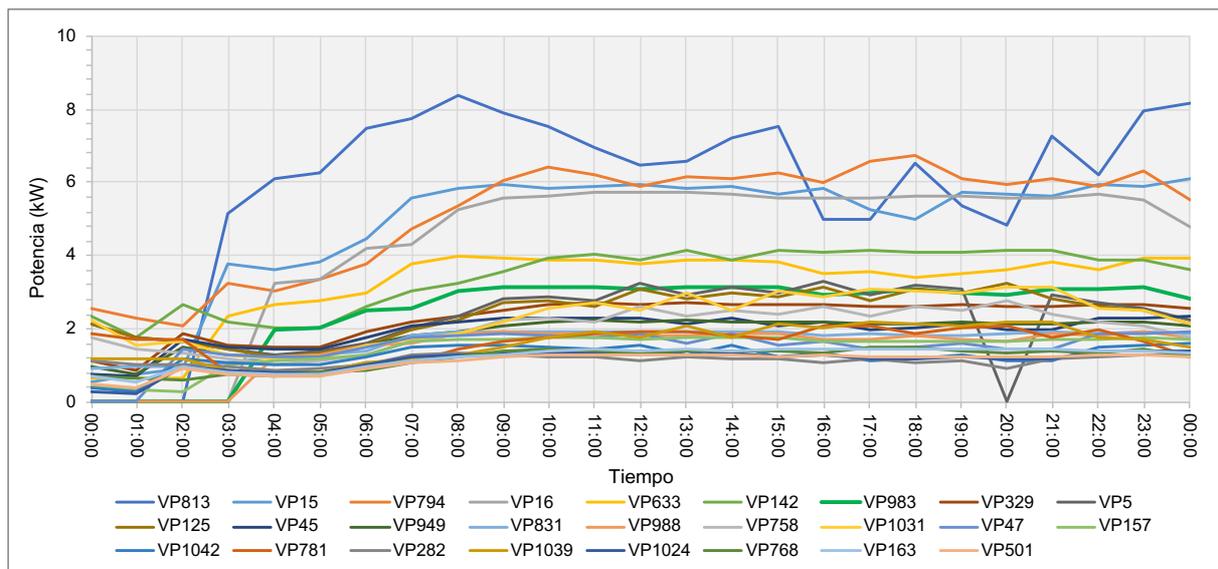


Figura 61. Gráfica de recuperación energética para los dispositivos instalados en la red C-Town.

Para efecto de visualizar la propuesta de solución planteada para la red C-Town se utilizó el IEE y el IER, los cuales permiten analizar la EPR_R respecto de la ERP_U . En la Tabla 12 se presenta el análisis energético de la red el cual considera los 26 escenarios diferentes en base al número de dispositivos de RE instalados en la red.

Tabla 12. Indicadores de energía de la red C-Town para las diferentes combinaciones de dispositivos instalados.

Nº Disp. RE	0	1	2	3	4	5	6	7	8
ER (kWh)	0.00	147.49	276.25	397.70	507.24	592.88	673.40	734.47	795.16
EPR (kWh)	7512.62	7365.13	7236.38	7114.93	7005.38	6919.75	6839.22	6778.15	6717.47
EPRn (kWh)	2168.38	2020.89	1892.13	1770.69	1661.14	1575.50	1494.98	1433.91	1373.23
EPRu (kWh)	5344.24	5344.24	5344.24	5344.24	5344.24	5344.24	5344.24	5344.24	5344.24
IEE	40.85%	42.01%	43.03%	43.98%	44.85%	45.52%	46.15%	46.64%	47.11%
IER	0.00%	6.80%	12.74%	18.34%	23.39%	27.34%	31.06%	33.87%	36.67%
Nº Disp. RE	9	10	11	12	13	14	15	16	17
ER (kWh)	854.52	912.70	969.99	1020.63	1069.28	1116.51	1158.40	1199.38	1239.79
EPR (kWh)	6658.10	6599.92	6542.63	6491.99	6443.35	6396.12	6354.23	6313.24	6272.84
EPRn (kWh)	1313.86	1255.68	1198.39	1147.75	1099.10	1051.88	1009.98	969.00	928.59
EPRu (kWh)	5344.24	5344.24	5344.24	5344.24	5344.24	5344.24	5344.24	5344.24	5344.24
IEE	47.58%	48.04%	48.49%	48.89%	49.27%	49.64%	49.97%	50.30%	50.61%
IER	39.41%	42.09%	44.73%	47.07%	49.31%	51.49%	53.42%	55.31%	57.18%
Nº Disp. RE	18	19	20	21	22	23	24	25	26
ER (kWh)	795.16	854.52	912.70	969.99	1020.63	1069.28	1116.51	795.16	1526.67
EPR (kWh)	6717.47	6658.10	6599.92	6542.63	6491.99	6443.35	6396.12	6717.47	5985.96
EPRn (kWh)	1373.23	1313.86	1255.68	1198.39	1147.75	1099.10	1051.88	1373.23	641.71
EPRu (kWh)	5344.24	5344.24	5344.24	5344.24	5344.24	5344.24	5344.24	5344.24	5344.24
IEE	47.11%	47.58%	48.04%	48.49%	48.89%	49.27%	49.64%	47.11%	52.87%
IER	36.67%	39.41%	42.09%	44.73%	47.07%	49.31%	51.49%	36.67%	70.41%

De los resultados presentados en la Tabla 12, se puede observar que en el caso de no realizar la instalación de ningún dispositivo de RE el IEE para la red es de 40.85% mientras que obviamente IER es equivalente a 0%. Por otra parte, en el caso de instalar 26 dispositivos de RE con mayor capacidad de potencia el IEE alcanza un valor de 52.87% mientras que el IER llega hasta el 70.41%.

4.6 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La posibilidad de valorar la resiliencia de un SDA mediante un indicador basado en términos energéticos resulta ser un aspecto clave para el desarrollo sostenible de los abastecimientos de agua. De la misma manera, determinar la cantidad y la correcta ubicación de aquellos dispositivos de recuperación energética a instalar puede considerarse imprescindible para compatibilizar tanto los aspectos técnicos como económicos a la hora de tomar decisiones para las compañías gestoras de los abastecimientos de agua.

De los resultados presentados se observa que la recuperación energética es tanto mayor cuanto mayor es el caudal inyectado. Esto se ve reflejado en el propio algoritmo de recuperación energética ya que en su composición depende de dos factores claramente diferenciados como lo son la demanda y la altura donde el valor de la resiliencia y por



consiguiente de la recuperación energética es directamente proporcional al valor que adquieran estos parámetros para uno de los periodos de análisis del sistema.

Del análisis de los resultados para las redes de estudio, se observa que posterior a la aplicación de la metodología asociada al cálculo del PREI, el índice de eficiencia energética para estos sistemas de abastecimiento aumenta entre un 8.88% y un 13.33% para un periodo de simulación de 24 horas. Por su parte, la resiliencia, la cual puede ser considerada como una medida en términos de energía adicional para hacer frente ante eventos que alteren el funcionamiento normal del sistema, se estima entre un 16.47% y un 29.36%.

Finalmente, a través de las soluciones obtenidas, la energía recuperada mediante la instalación de dispositivos de recuperación energética en diferentes puntos de la red varía entre el 45.65% y un 70.41% de la energía potencialmente recuperable total, llevando estos porcentajes a términos de potencia, se puede estimar que estos valores rondan entre los 1030.25 kWh y los 1634.95 kWh.



CAPÍTULO V: INDICADOR DE RESILIENCIA BASADO EN EL DÉFICIT DE ENERGÍA

5.1 INTRODUCCIÓN

Dentro de las redes de abastecimiento existe un sin número de elementos que componen el sistema y que permiten el suministro de agua a la población. Sin embargo, el fallo de alguno de estos elementos puede tener consecuencias de carácter leve o inclusive hasta producir un fallo en cadena de la propia red. Sin duda, dentro de los elementos que componen una SDA aquellos que poseen una mayor presencia dentro de la red son las tuberías, las cuales son las encargadas de transportar el agua desde las fuentes de suministro hasta los nudos de consumo de la red.

En gran medida las redes de distribución de agua dentro de los centros urbanos se encuentran enterradas por lo cual se deterioran. Debido a ello, una de las principales consecuencias es la constante aparición de roturas en las tuberías que conforman la red (Watson et al. 2004). Este tipo de eventos traen consigo un elevado coste tanto en apartado técnico, económico, medioambiental como social, por lo cual, hoy en día las empresas gestoras de los abastecimientos de agua enfocan una gran cantidad de recursos y tecnología a reducirlas en la medida de los posible. Por lo tanto, el estudio de la casuística asociada a este tipo de fenómenos es uno de los principales objetivos de estudio de la comunidad científica en cuanto a las redes de agua en los centros urbanos.

Desde la perspectiva de Todini (2000) considera a la resiliencia hidráulica como un parámetro que integra el concepto de energía como factor preponderante para los sistemas de abastecimiento de agua. Por ello, los estudios relacionados con la eficiencia energética y con aquellas medidas que integran el consumo energético como parámetro de análisis en los sistemas de abastecimiento de agua se han convertido en uno de los enfoques más significativos y con mayor línea de actuación debido a la creciente demanda energética por parte de la población mundial durante los últimos años.

De esta manera, integrar medidas que permitan el análisis de la resiliencia hidráulica para los SDA cobra cada vez una mayor importancia sobre todo frente a la creciente problemática relacionada con la incapacidad de satisfacer las demandas de los usuarios. Suministrar a la población bajo los parámetros mínimos requeridos producto del fallo inesperado de los elementos que componen el sistema se ha convertido en uno de los puntos más significativos para los gestores de los abastecimientos de agua debido a las proyecciones demográficas con miras hacia el futuro.

La incertidumbre en la demanda debido al fallo de las tuberías de la red es un concepto que se ha ido desarrollando durante los últimos años (Gheisi & Naser, 2015). Sin embargo, la incorporación del análisis energético como parte de esta evaluación aún se considera como una temática en desarrollo, donde la investigación continúa abierta a la implementación del concepto de resiliencia hidráulica como parámetro característico ante este tipo de eventos.

5.2 DESCRIPCIÓN GENERAL

Por lo general, para estimar la resiliencia se mide la capacidad que posee el sistema para hacer frente ante escenarios adversos mediante la absorción de aquellos efectos no deseados sobre sus operaciones normales, adaptándose al nuevo entorno operativo (Shin et al. 2018). En la gran mayoría de casos, la evaluación de la resiliencia se realiza mediante métodos probabilístico los cuales requieren métodos computacionalmente exigentes y difíciles de implementar dado los diseños complejos de los SDA (Liu et al. 2016).

Para abordar este tipo de problemas, se ha propuesto evaluar la resiliencia en términos del déficit energético de la red al producirse el fallo de las tuberías que conforman el sistema de distribución. El déficit energético se evalúa como la cantidad de energía que el sistema no es capaz de suministrar a los nudos de consumo de la red, medido en referencia a las condiciones mínimas de funcionamiento en términos de presión y demanda.

$$\text{Déficit Energético} = \gamma \cdot H_t \cdot Q_t < \gamma \cdot H_{min,t} \cdot Q_t \quad (29)$$

Este capítulo tiene como principal objetivo el desarrollo de una metodología que incorpore una aproximación al cálculo de la resiliencia hidráulica de un SDA, la cual permita obtener una medida sustitutiva que relacione el fallo de las tuberías con el déficit energético que se genera producto de este tipo de eventos. Para ello, partiendo de estudios previos que son ampliamente reconocidos y utilizados como lo son la entropía del flujo, índice de resiliencia, índice de resiliencia hidráulica de tuberías y el estimador de confiabilidad mecánica se propone la creación de una nueva metodología de análisis de la resiliencia enfocada a los SDA.

A partir de las investigaciones desarrolladas y de aquellos autores que trabajaron las diversas medidas sustitutivas de evaluación de la resiliencia enfocada en los sistemas de

infraestructura hidráulica bajo parámetros cuantitativos, se puede observar la variedad de factores implementados dentro de los indicadores para evaluar las redes de agua. En la mayoría de las fórmulas y algoritmos estudiados es posible identificar una tendencia en la inclusión de variables como la demanda y la presión en los nudos de consumo como parámetro de análisis. Estos conceptos los cuales se encuentran estrechamente vinculados con el análisis energético del sistema de abastecimiento.

Es cada vez más significativo evaluar la resiliencia hidráulica en términos cuantificables y aplicables a distintos tipos de sistemas de suministro de agua. Para ello, es necesario definir los parámetros asociados al fallo de las tuberías y definir su directa implicación en el déficit energético de la red producto de este tipo de eventos. Una de las principales dificultades de este estudio se da a la hora de definir los parámetros de las tuberías que serán utilizados para estudiar la resiliencia de la red y que permitan realizar una comparativa de los resultados obtenidos.

Por tanto, para efectos de visualizar la estructura de trabajo, a continuación se describen algunos de los ítems establecidos para el desarrollo de esta metodología:

- Implementar un procedimiento que permita la simulación del fallo o rotura de las tuberías a través del modelo matemático de la red formulado en EPANET.
- Establecer parámetros característicos de las tuberías que puedan ser incorporadas en el análisis de la resiliencia.
- Definir una medida sustantiva en forma de indicador que permita evaluar la resiliencia de la red en base al déficit de energía producto del fallo de las tuberías.
- Desarrollar el algoritmo de cálculo el cual integre el indicador de resiliencia para ser aplicable a redes de distribución de agua tanto en régimen permanente como extendido.
- Añadir al modelo informático el algoritmo correspondiente al indicador de resiliencia desarrollado.
- Realizar un análisis energético para las soluciones obtenidas.

Si se revisa la literatura enfocada en el estudio de la resiliencia hidráulica y la importancia de las tuberías de la red, es frecuente encontrar análisis realizados en los que se incluyen medidas como el diámetro, la rugosidad y el material de estos elementos. Por ello, otras características de las tuberías diferentes a las mencionadas anteriormente serán utilizadas para el desarrollo de esta metodología. Así, se asume la utilización de las medidas de longitud, volumen y caudal como aquellos factores los cuales pueden ser parametrizados y cuyos resultados pueden influir en el cálculo de la resiliencia del sistema.

Puesto que el objetivo de estudio se centra en la utilización del concepto de déficit energético producto del fallo de las tuberías en un sistema de abastecimiento, para producir de forma controlada este tipo de eventualidades se requiere de un modelo matemático previamente desarrollado y correctamente estructurado que permita realizar este tipo de análisis de la red de la forma más práctica posible, además de poseer una presión de servicio en cada uno de los puntos de demanda de red que se deba respetar y sobre la cual trabajar.

5.2.1 Desarrollo de la metodología planteada

La hipótesis fundamental sobre la cual se sostiene la metodología propuesta plantea que para que exista déficit de energía, la presión en los nudos de consumo de la red debe ser

inferior a la presión mínima requerida para estos puntos. Además, la aplicabilidad de la metodología será válida para cualquier SDA siempre y cuando éste se encuentre definido completamente, es decir, cuando exista la posibilidad de calcular los caudales circulantes por las tuberías de la red y la presión de los nudos de consumo.

Con el objetivo de ilustrar de la mejor manera la metodología se analizará su aplicación sobre una red de agua construida a manera de ejemplo. Esta red presenta un embalse de cabecera, un depósito elevado, 10 nudos de consumo y 14 tuberías. Como parámetro fundamental en todos los nudos de consumo de la red se requiere de una presión de 20 mca. A continuación, en la Figura 62 se presenta el modelo matemático de la red de abastecimiento junto con el resultante del cálculo de presiones.

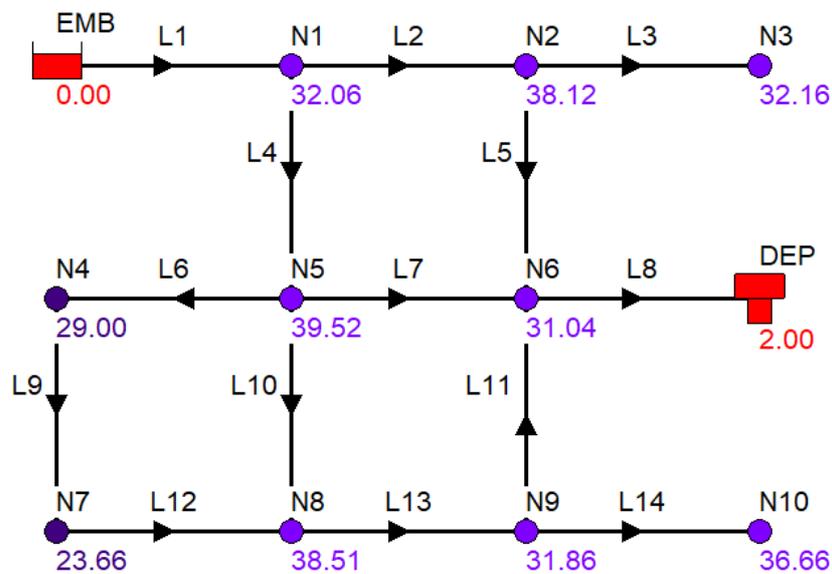


Figura 62. Red de ejemplo B. Resultante de presiones y caudales.

Como se puede observar, en todos los nudos de consumo de la red se cumple la consigna de presión mínima, por lo cual no existe un déficit de presión en la red lo que asegura la ausencia de un déficit energético en el sistema. Sin embargo, puesto que el principal objetivo de la metodología consta en cuantificar el déficit de energía en forma de presión existente en la red debido a la rotura de las tuberías, la manera en la que se simula el fallo de estos elementos es a través del cierre de la tubería dentro del modelo matemático.

Dentro de un sistema de abastecimiento de agua es común encontrar la presencia de válvulas las cuales son utilizadas en diferentes ocasiones para sectorizar la red además de salvaguardar y controlar las presiones y caudales. De la misma manera, en algunas ocasiones se puede estar en presencia de tuberías que se encuentran inoperativas o cerradas dentro de la red, debido a que su apertura puede provocar tanto un aumento como una disminución en las presiones del sistema además de la modificación de los caudales circulantes de la red.

Sin embargo, en el momento que se produce la rotura de una tubería estos elementos pueden ser utilizados para reestructurar el funcionamiento de la red, modificando la consigna de apertura o cierre de las válvulas además de la apertura de aquellas tuberías que se encuentran cerradas, con lo cual se obtiene una nueva configuración de la red que puede

permitir resistir este tipo de eventos que afectan a un SDA. La estructura principal de la metodología se detalla en el diagrama de flujo de la Figura 63.

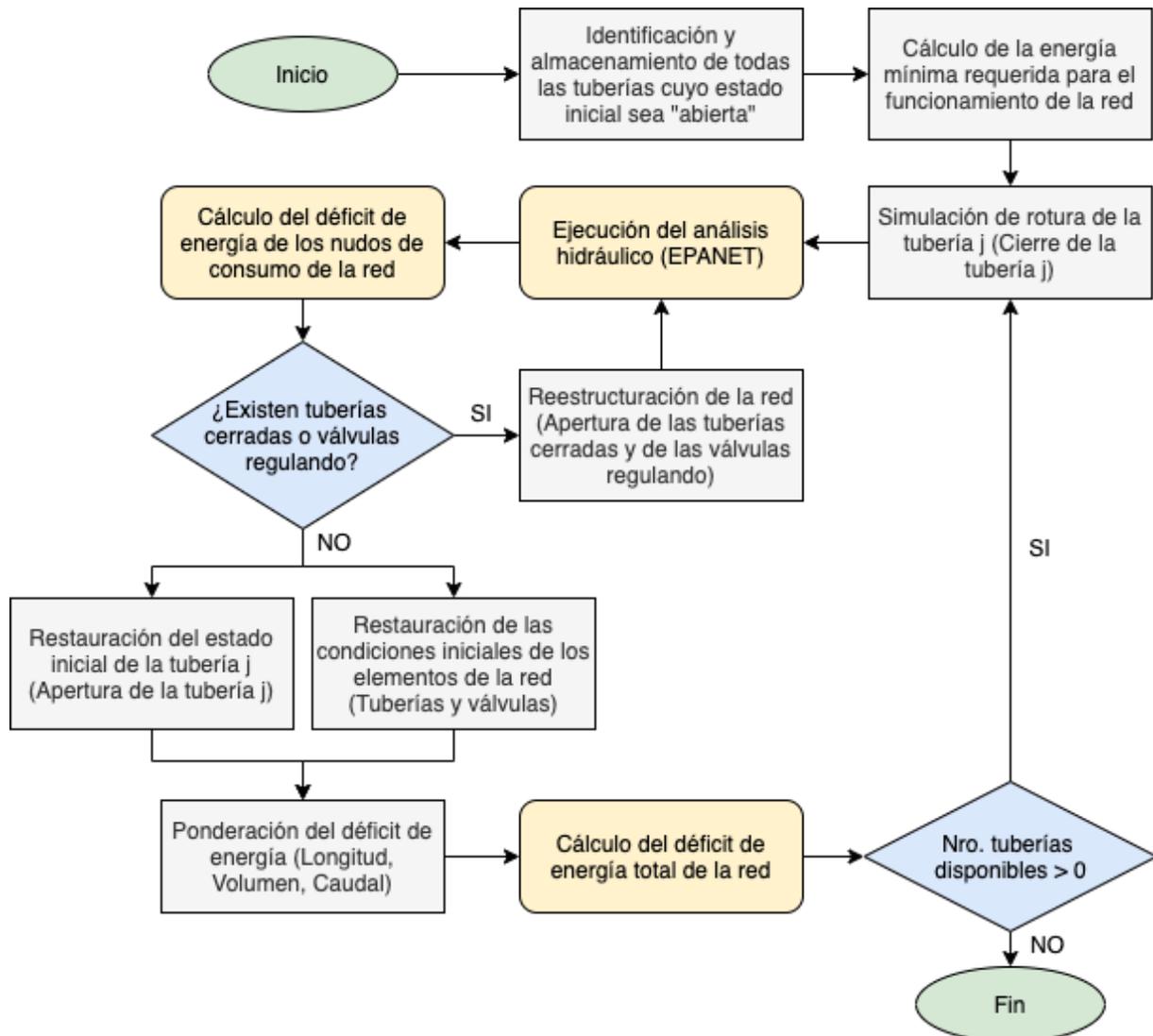


Figura 63. Diagrama de flujo de la metodología para evaluar el déficit energético en un SDA.

En la Figura 64 se representa el cierre de la tubería L1 mediante un escenario diferente de la red lo cual implica una nueva simulación hidráulica. Para este caso, a simple vista se puede identificar una nueva distribución en la orientación de los caudales además de la alteración de las presiones de la red, donde los nudos de consumo N1, N3 y N7 presentan presiones inferiores a 20 metros.

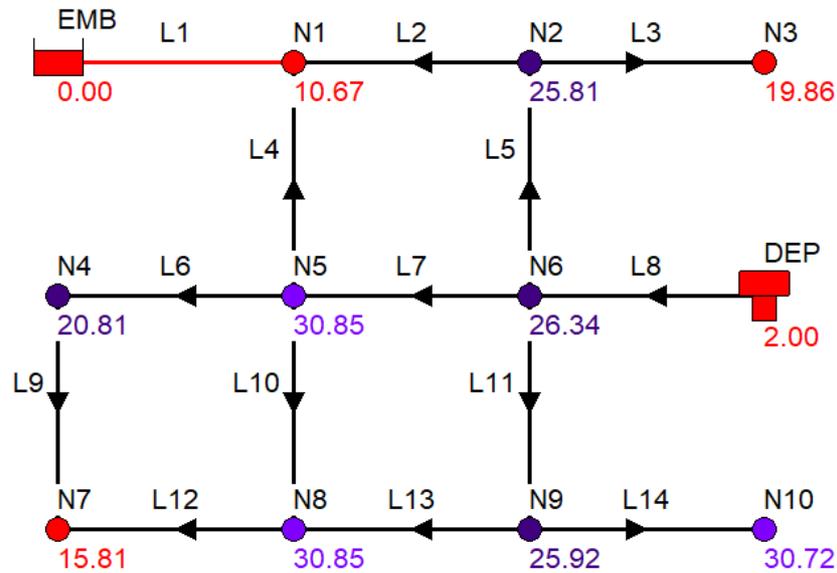


Figura 64. Escenario 1: Rotura de la tubería L1.

Para el nudo N1 existe un déficit de presión de 9.33 metros, para el nudo N3 este valor es de 0.14 metros y para el nudo N7 el déficit corresponde a 4.19 metros. Por lo antes expuesto, se concluye que el sistema bajo estas nuevas condiciones de funcionamiento no presenta la capacidad de abastecer a todos los nudos de la red con las condiciones mínimas de servicio requeridas. A continuación, en la Tabla 13 se presenta un análisis energético de los nudos de consumo afectados producto de la rotura de la tubería L1.

Tabla 13. Análisis energético de la red producto de la rotura de la tubería L1.

ID	Demanda (l/s)	Elevación (m)	Déficit de Presión (m)	Déficit de Potencia (kW)	Presión Mínima Requerida (m)	Potencia Mínima Requerida (kW)
N1	15	50	9.33	8.73	20	10.30
N2	3	35	-	-	20	1.62
N3	4	40	0.14	1.58	20	2.35
N4	3	40	-	-	20	1.77
N5	2	30	-	-	20	0.98
N6	2	35	-	-	20	1.08
N7	4	45	4.19	1.93	20	2.55
N8	1	30	-	-	20	0.49
N9	3	35	-	-	20	1.62
N10	5	30	-	-	20	2.45
Total				12.24		25.21

A partir de los resultados obtenidos, se puede determinar que el déficit de energía generado representa el 48.53% de la energía mínima requerida en los nudos de consumo para el correcto funcionamiento del sistema. Sin embargo, para cuantificar la relevancia de esta tubería en el funcionamiento general del sistema es que el valor del déficit de energía global de la red se puede ponderar a través de un parámetro característico de este elemento. Para ello se seleccionó la longitud, el volumen de agua que almacena y el caudal que circula a través de ella en condiciones normales de funcionamiento, brindando de esta manera una

característica propia del elemento en el cálculo de la resiliencia de la red. En la Tabla 14 se presenta la información de los parámetros de las tuberías de la red las cuales son utilizadas para la estimación del cálculo del déficit de energía ponderado de la red.

Tabla 14. Parámetros característicos de las tuberías de la red.

ID	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Volumen (m3)	Caudal (l/s)
Tubería L1	400	1000	12.57	150.75
Tubería L2	200	500	3.14	61.98
Tubería L3	100	300	0.79	4.00
Tubería L4	200	500	3.14	73.78
Tubería L5	200	500	3.14	54.98
Tubería L6	200	500	3.14	13.98
Tubería L7	200	500	3.14	38.02
Tubería L8	300	600	7.07	108.75
Tubería L9	200	500	3.14	10.98
Tubería L10	200	500	3.14	19.78
Tubería L11	200	500	3.14	17.76
Tubería L12	200	500	3.14	6.98
Tubería L13	200	500	3.14	25.76
Tubería L14	150	300	1.77	5.00
Total		7200	53.60	592.5

Si se pondera el déficit energético de la red producido por el fallo de la tubería L1 a través de la longitud de ésta, se obtiene como resultado que la red posee un 93.26% de capacidad energética para suministrar a estos nudos de consumo los niveles de consigna requeridos. A su vez, si se pondera el déficit energético mediante el volumen de agua que es posible almacenar en la tubería L1 se obtiene un 88.62% de capacidad de suministro energético por parte de la red. Finalmente, al ponderar el déficit mediante el producto de la longitud de la tubería y el caudal que circula a través de ésta para el escenario original, se obtiene que la red presenta una capacidad de suministro energético equivalente al 80.78% producto de la rotura de la tubería L1.

Posteriormente se procede a simular la rotura de la tubería L2 la cual es representada a través del escenario 2 en la Figura 65. Para este caso se observa que dentro de la red la totalidad los nudos de consumo presentan una presión superior al valor de la presión consigna requerida, por lo tanto no existe déficit energético en la red. Esto se justifica a través de la redundancia que presenta la red, ya que ésta posee un mallado en su estructura lo que brinda más de una ruta de suministro hacia los nudos de consumo.

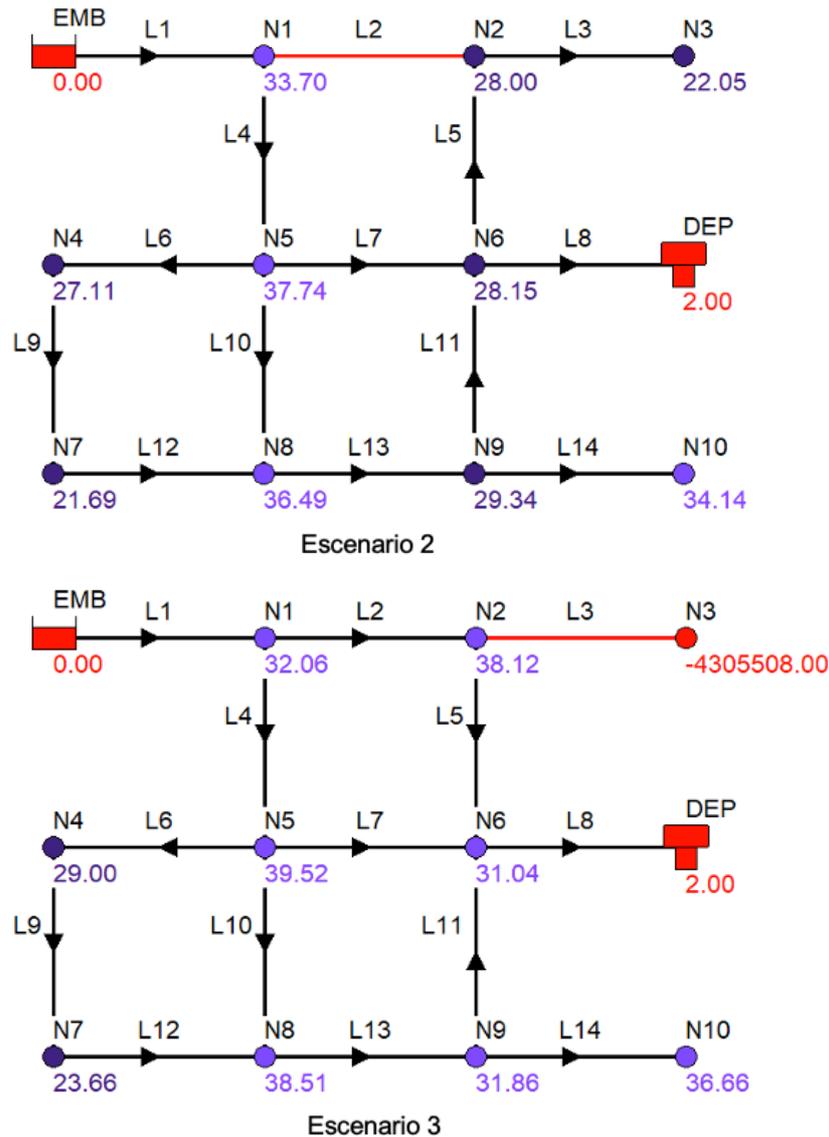


Figura 65. Escenario 2: Rotura de L2. Escenario 3: Rotura de L3.

Para el escenario 3 donde se simula la rotura de la tubería L3, una vez ejecutada la simulación hidráulica, se puede identificar que solo existe un nudo de consumo de la red que presenta valores inferiores a la presión mínima requerida. Sin embargo, el déficit de presión que presente este nudo es de 4.31×10^6 metros. Esto se produce debido a que al interior del entorno de EPANET se genera una desconexión del nudo N3 respecto de la red, por lo cual las ecuaciones hidráulicas una vez se ejecuta la simulación son resueltas aún cuando existe este error dentro de la estructura de la red. No obstante, realmente el déficit en forma de presión que existe en el nudo N3 corresponde al valor de la presión mínima requerida en el nudo que para este caso equivale a 20 metros. A partir del aislamiento de este nudo la demanda no puede ser suministrada con la presión necesaria la cual siempre va a ser superior a 0 metros en los nudos de consumo, por lo tanto, se sostiene como base de la hipótesis que las presiones en estos puntos siempre son superiores al valor mínimo.

De los resultados presentados, se puede determinar que el déficit de energía generado representa el 9.34% de la energía mínima requerida. Como el objetivo de la metodología es

representar la importancia de la tubería frente al resto de elementos que componen la red, al ponderar los resultados a través de la longitud, se obtiene como resultado que la red posee un 99.61% de capacidad energética para suministrar la demanda de los nudos. Si se pondera este déficit mediante el volumen de agua se obtiene un 99.86% de capacidad de suministro energético por parte de la red. Finalmente, si se realiza la ponderación del déficit mediante la utilización del producto de la longitud de la tubería y el caudal que circula a través de ésta se obtiene que la red presenta un 99.97% de capacidad de suministro energético para los nudos de consumo producto de la rotura de la tubería L3.

Este proceso iterativo se realiza para cada una de las tuberías de la red que se encuentren abiertas dentro de la configuración de estado inicial, obteniendo de esta manera el déficit de presión de la red para cada uno de los posibles escenarios de simulación que puedan presentarse y ponderando este valor por cada uno de los parámetros anteriormente señaladas.

5.3 DEFINICIÓN DE LOS ÍNDICES DE RESILIENCIA

La finalidad de este apartado es presentar los indicadores de resiliencia desarrollados para analizar el déficit energético producto de la rotura de las tuberías en una red de abastecimiento de agua. Es así, como se plantean tres índices diferentes los que integran el análisis energético dentro de su estructura de cálculo, los cuales son ponderados por un parámetro característico de las tuberías que componen el sistema.

5.3.1 Índice de déficit energético ponderado por la longitud

El Índice de Déficit Energético Ponderado por la Longitud (EDI_L) representa la cantidad de energía necesaria para mantener el funcionamiento de la red bajo las condiciones mínimas de operatividad ante un evento de rotura o cierre de tuberías en la red, incorporando la longitud de las tuberías como parámetro para su estimación.

$$EDI_L = 1 - \frac{\sum_{t=0}^{N_{inst}} \sum_{j=1}^P L_{j,t} \cdot \left[\sum_{t=0}^{N_{inst}} \sum_{i=1}^N D_{i,t} \cdot (H_{i,t}^{(req)} - H_{i,t}) \right] \cdot \delta_{i,t}}{\sum_{t=0}^{N_{inst}} \sum_{j=1}^P L_{j,t} \cdot \left[\sum_{t=0}^{N_{inst}} \sum_{i=1}^N D_{i,t} \cdot H_{i,t}^{(req)} \right]} \quad (30)$$

De esta expresión, $\delta_{i,t}$ corresponde a la variable de anidamiento que condiciona la operación de cálculo ante la ausencia de déficit energético, que viene dado por la siguiente expresión:

$$\delta_{i,t} = \begin{cases} 0 & \text{si } H_{i,t} \geq H_{i,t}^{(req)} \\ 1 & \text{si } H_{i,t} < H_{i,t}^{(req)} \end{cases} \quad (31)$$

Donde:

- P corresponde al conjunto de tuberías.
- N representa el conjunto de nudos de consumo.
- $L_{j,t}$ corresponde a la longitud de la tubería j que simula la rotura o cierre de la misma para el instante t .

5.3.2 Índice de déficit energético ponderado por el volumen

El Índice de Déficit Energético Ponderado por el Volumen (EDI_V) representa la cantidad de energía necesaria para mantener el funcionamiento de la red bajo las condiciones mínimas de operatividad ante un evento de rotura o cierre de tuberías en la red, incorporando el volumen de agua almacenado al interior de las tuberías como parámetro para su estimación.

$$EDI_V = 1 - \frac{\sum_{t=0}^{N_{inst}} \sum_{j=1}^P V_{j,t} \cdot \left[\sum_{t=0}^{N_{inst}} \sum_{i=1}^N D_{i,t} \cdot (H_{i,t}^{(req)} - H_{i,t}) \right] \cdot \delta_{i,t}}{\sum_{t=0}^{N_{inst}} \sum_{j=1}^P V_{j,t} \cdot \left[\sum_{t=0}^{N_{inst}} \sum_{i=1}^N D_{i,t} \cdot H_{i,t}^{(req)} \right]} \quad (32)$$

Donde:

- $V_{j,t}$ corresponde al volumen de agua que se almacena en condiciones normales de funcionamiento al interior de la tubería j que simula la rotura o cierre de la misma para el instante t .

5.3.3 Índice de déficit energético ponderado por la longitud y caudal

El Índice de Déficit Energético Ponderado por la longitud y Caudal (EDI_{LF}) representa la cantidad de energía necesaria para mantener el funcionamiento de la red bajo las condiciones mínimas de operatividad ante un evento de rotura o cierre de tuberías en la red, incorporando el volumen de agua almacenado al interior de las tuberías y el caudal que circula a través de estas como parámetro para su estimación.

$$EDI_{LF} = 1 - \frac{\sum_{t=0}^{N_{inst}} \sum_{j=1}^P L_{j,t} \cdot Q_{j,t} \cdot \left[\sum_{t=0}^{N_{inst}} \sum_{i=1}^N D_{i,t} \cdot (H_{i,t}^{(req)} - H_{i,t}) \right] \cdot \delta_{i,t}}{\sum_{t=0}^{N_{inst}} \sum_{j=1}^P L_{j,t} \cdot Q_{j,t} \cdot \left[\sum_{t=0}^{N_{inst}} \sum_{i=1}^N D_{i,t} \cdot H_{i,t}^{(req)} \right]} \quad (33)$$

Donde:

- $Q_{j,t}$ corresponde al caudal que transporta la tubería j en condiciones normales de funcionamiento para el instante t .

5.4 CASO DE APLICACIÓN

Para poner a prueba la metodología desarrollada y los indicadores de resiliencia propuestos los cuales basan su estructura en el análisis del déficit energético de los SDA producto del fallo de las tuberías de la red los cuales han sido integrados dentro del modelo informático desarrollado, se presenta a manera de resumen las 2 redes de estudio donde se aplicaron los algoritmos de cálculo asociados a los índices de resiliencia.

5.4.1 BWSN Network 1

La red BWSN Network 1 (ver Figura 66) presentada por Ostfeld et al. (2008) como parte de la "Battle of the Water Sensor Networks (BWSN): A Design Challenge of Engineers and Algorithms", se basa en un sistema de distribución de agua real que se encuentran retorcido con el objetivo de preservar su anonimato, la cual forma parte de la base de datos de los modelos de referencia de EPANET del centro de Exeter para Sistemas de Agua ECWS.

Esta red se estructura mediante 1 embalse de cabecera, 2 depósitos elevados, 2 bombas, 126 nudos de consumo, 168 tuberías y 8 válvulas. La demanda nodal promedio es de 257.68

m³/h y la longitud total de las tuberías de la red es de 37.56 km con diámetros entre 8 y 30 pulgadas.

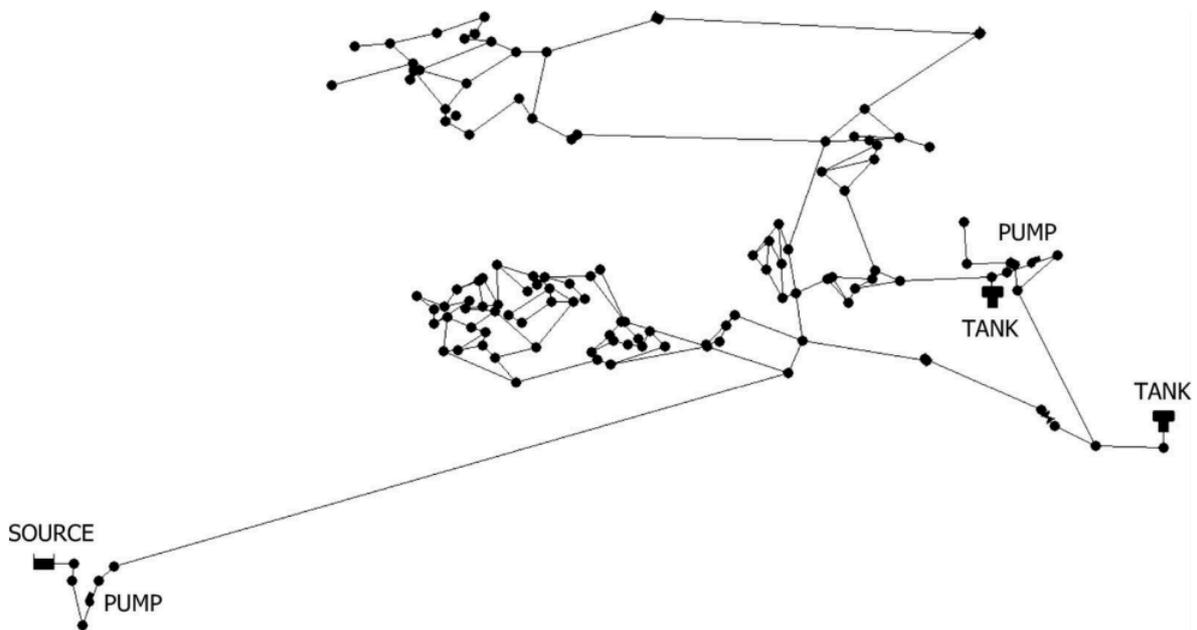


Figura 66. Modelo matemático de la red de BWSN Network 1.

A continuación, en la Figura 67, Figura 68, Figura 69 y en la Figura 70 se presentan algunas de las propiedades de los elementos que componen el sistema como lo son; el patrón de demanda de los nodos de consumo, curvas de bombeo y los controles simples y programados que incorpora el sistema.

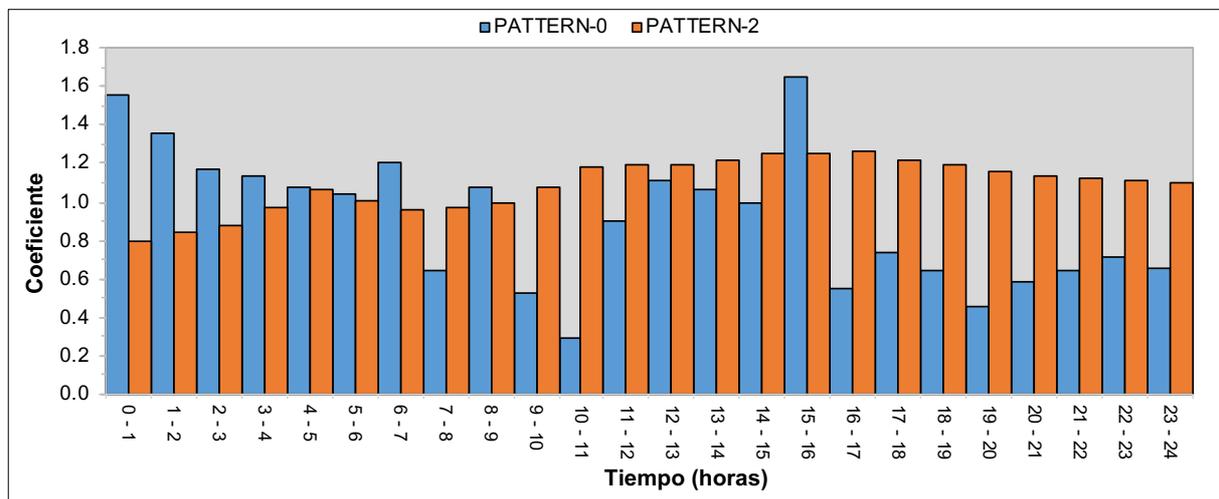


Figura 67. Patrones de demanda de los nodos de consumo Pattern-0 y Pattern-2.

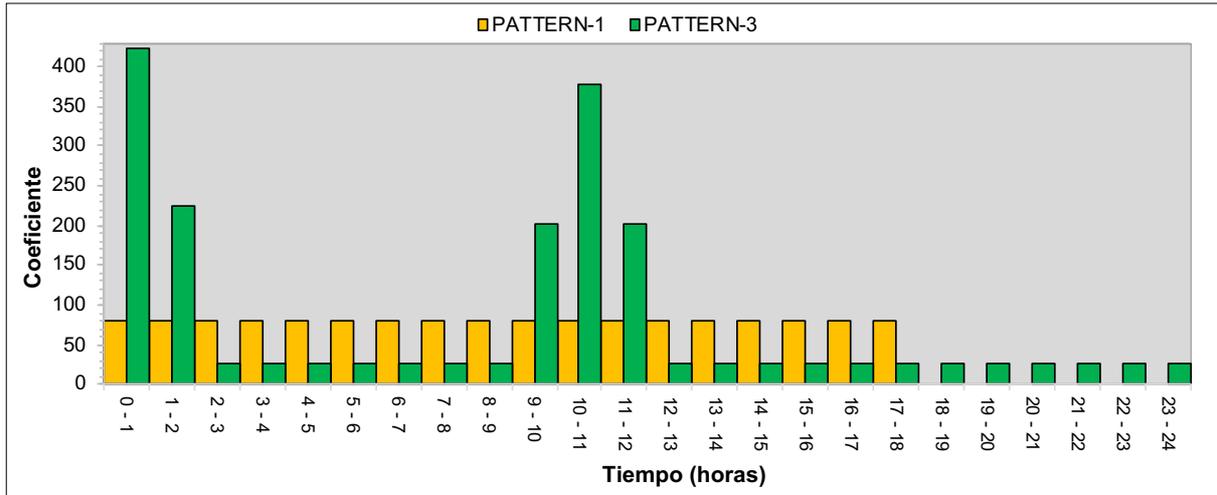


Figura 68. Patrones de demanda de los nudos de consumo Pattern-1 y Pattern-4.

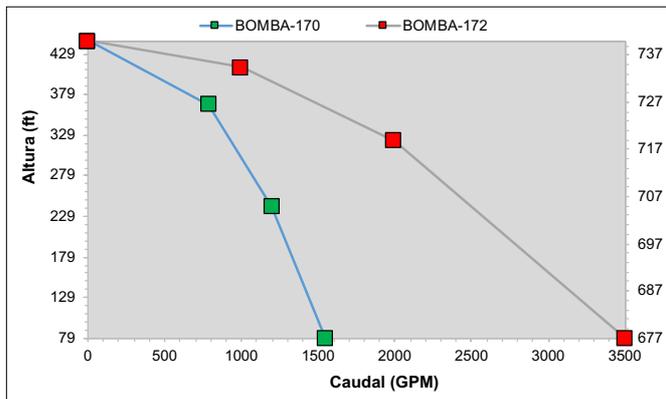


Figura 69. Curvas de las bombas.

```

Controles BWSN.txt — Modificado

;CONTROLES SIMPLES //

LINK VALVE-180 Closed At Time 0.00

;CONTROLES PROGRAMADOS //

;RULE RULE-0
IF TANK TANK-130 LEVEL >= 16.00
THEN PUMP PUMP-172 STATUS IS CLOSED
PRIORITY 1.00

;RULE RULE-1
IF TANK TANK-130 LEVEL <= 12.10
THEN PUMP PUMP-172 STATUS IS OPEN
PRIORITY 1.00

;RULE RULE-3
IF TANK TANK-131 LEVEL >= 18.40
THEN PUMP PUMP-170 STATUS IS CLOSED
PRIORITY 1.00

;RULE RULE-4
IF TANK TANK-131 LEVEL <= 15.40
THEN PUMP PUMP-170 STATUS IS OPEN
Priority 1.00
    
```

Figura 70. Controles simples y programados.

5.4.2 Santa Marta

La red de abastecimiento de agua de Santa Marta ubicada en el departamento de Magdalena en la zona noreste de Colombia en la región Caribe se encuentra compuesta por 13861 tuberías de diversas longitudes, diámetros, materiales y rugosidades sumando un total aproximado de 875 km de tuberías las cuales se encargan de conectar los 11042 nudos de consumo presentes a lo largo del sistema. Además, se cuenta con un total de 17 depósitos de regulación a lo largo de la red, 2 estaciones bombeo: Gaira y Universidad, y 5 embalses que abastecen de agua a la población, dentro de los que se encuentran: el Roble, Gaira, Universidad, Toribio y el Curval.

El embalse el Curval se ubica en la zona noreste de la ciudad el cual es alimentado por el río el Manzanares, cuya cota es de 200 msnm. El embalse Universidad se encuentra ubicado a nivel del mar en la zona noreste de Santa Marta, también abastecido por el río Manzanares.

El embalse el Roble, el cual posee una altura de 60 msnm se ubica en la zona este de la región de Magdalena, el cual es alimentado por el río Gaira. El embalse Gaira se ubica a nivel del mar en la zona central de la red de abastecimiento, el cual es alimentado por el río Gaira. Para finalizar, el embalse Toribio el cual representa la principal fuente de suministro de agua de la ciudad de Santa Marta, ubicado en la zona sur de la red, posee una elevación de 125 msnm el cual es alimentado por el río Toribio. En la Figura 71 se muestra la localización de cada uno de los embalses y depósitos de regulación presentes en la red de Santa Marta.

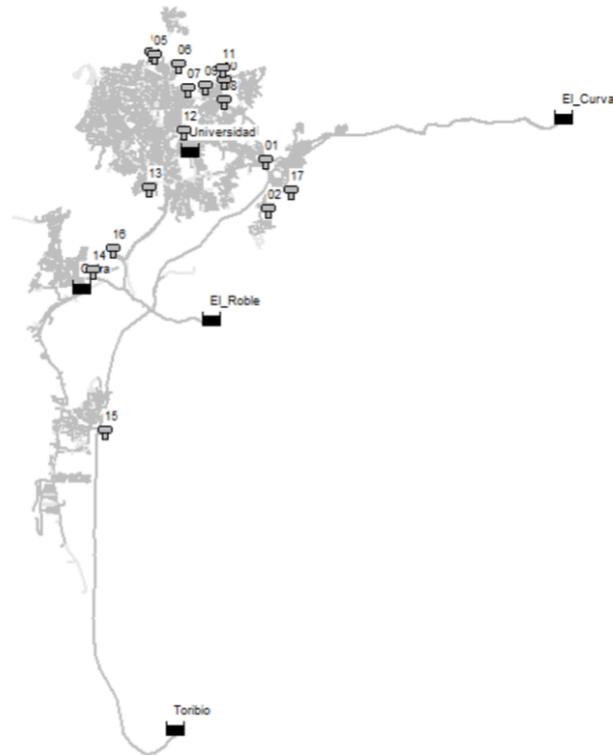


Figura 71. Localización de los embalses y depósitos para la red de Santa Marta.

A partir de los datos recopilados de la red Santa Marta, en la Tabla 15 se exponen los límites de extracción de agua para cada uno de los embalses y estaciones de bombeo presentes en el sistema, los cuales se encuentran claramente diferenciados mediante la estación del año correspondiente. Se puede observar, que durante la estación húmeda la producción y suministro de agua alcanza los 2850 l/s, mientras que para la estación seca durante el cual el requerimiento de agua por parte de la población es mayor, la producción y suministro de agua solo alcanza los 2080 l/s.

Tabla 15. Límites de extracción de los embalses para la red de Santa Marta.

ID Embalse	Caudal Medio (l/s)	
	Estación Húmeda	Estación Seca
El Curval	800	420
Universidad	-	314
El Roble	450	240
Gaira	-	206
Toribio	1600	900
Total	2850	2080

La red de abastecimiento de Santa Marta se encuentra dividida geográficamente en 3 zonas claramente diferenciadas como lo son: el sector norte, centro y sur como se representa en la Figura 72. Para el presente caso de estudio se trabajará únicamente con el modelo matemático del sector sur de la red, el cual se abastece principalmente mediante los embalses el Roble y Toribio, y a través de los depósitos de regulación 14 y 15. Además, como se explicó anteriormente, durante la estación seca la producción y suministro de agua resulta insuficiente para satisfacer las demandas de los usuarios, por lo cual se complementa este suministro a través de la estación de bombeo de Gaira la que brinda ayuda en el abastecimiento de la población en la zona sur de la red.

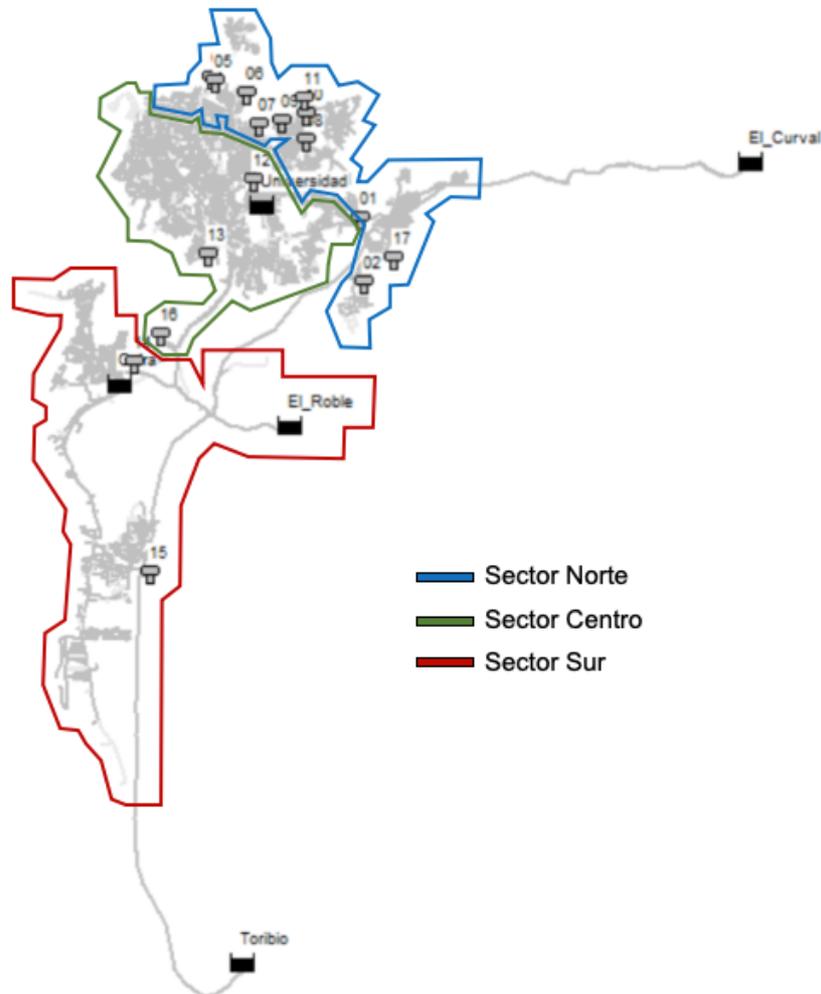


Figura 72. Sectorización de la red de Santa Marta.

El modelo matemático del sector sur de red de Santa Marta (ver Figura 73) está compuesto por 3 embalses de cabecera, 2 depósitos elevados, 2 bombas, 1916 nodos de consumo, 2311 tuberías y 27 válvulas. La demanda nodal promedio es de $1446.41 \text{ m}^3/\text{h}$ y la longitud total de las tuberías de la red es de 183.37 km con diámetros entre 75 y 1524 milímetros.

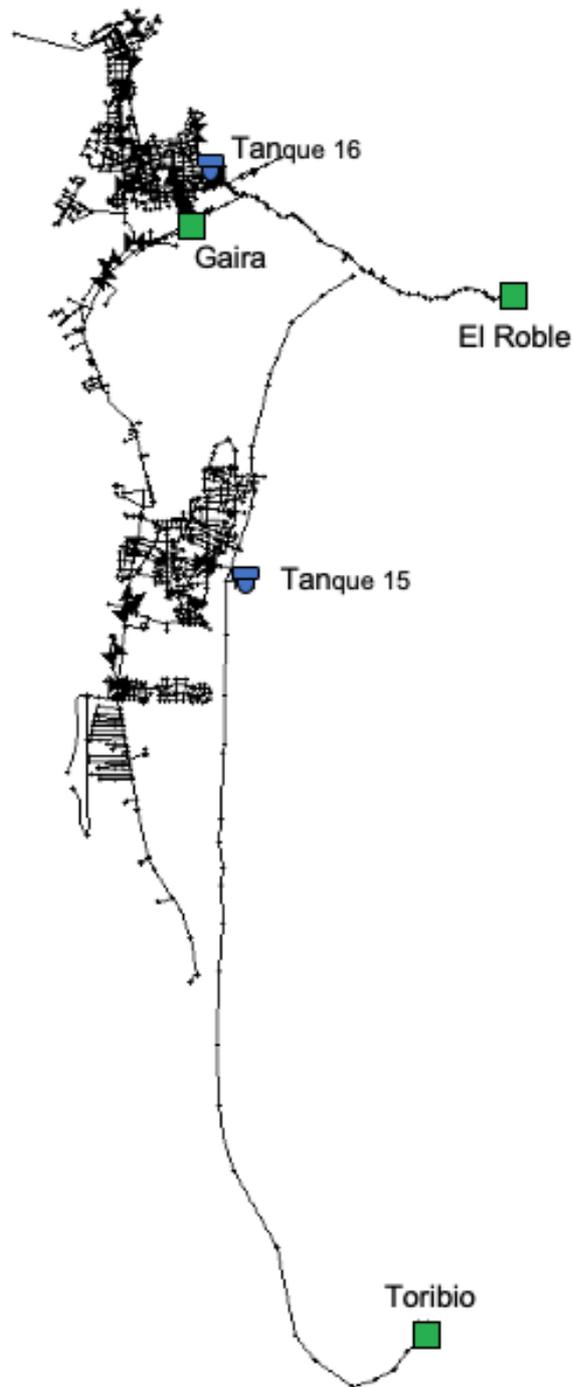


Figura 73. Modelo matemático del sector sur de la red de Santa Marta.

A continuación, en la Figura 74, Figura 75 y en la Figura 76 se presentan algunas de las propiedades de los elementos que componen el sistema como lo son; el patrón de demanda de los nodos de consumo, curvas de las bomba y los controles que regulan el nivel de agua de los depósitos que mediante el arranque y parada de la bomba Mohan2 que incorpora el sistema.

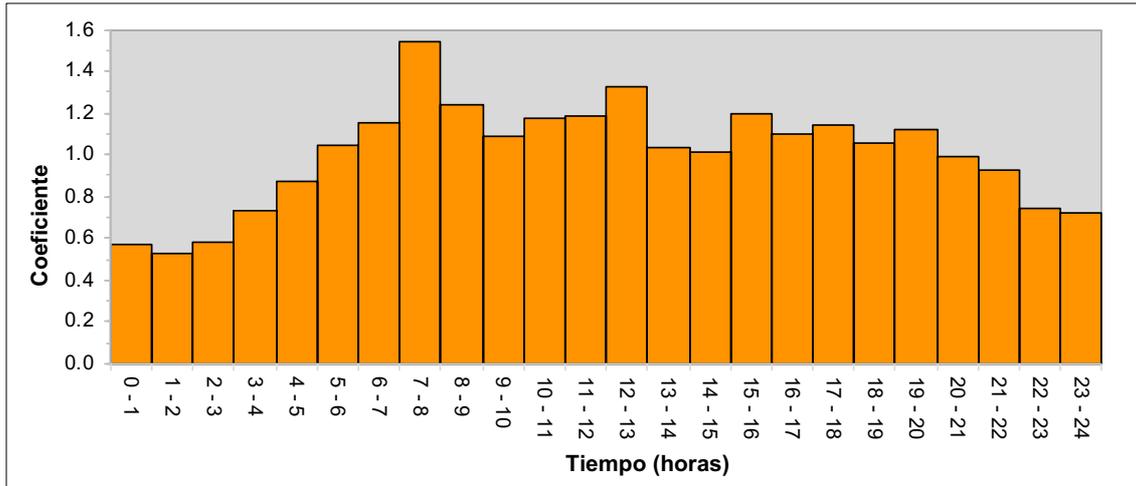


Figura 74. Patrón de demanda de los nudos de consumo.

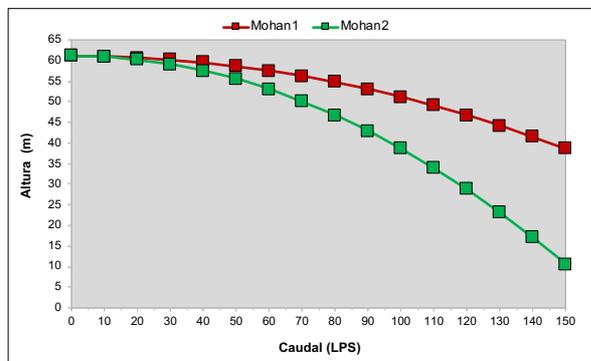


Figura 75. Curvas de las bombas Mohan1 y Mohan2 de la estación de Gaira.

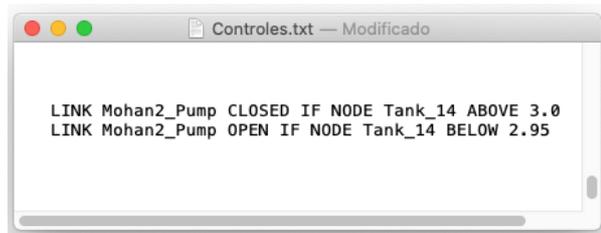


Figura 76. Controles de arranque y parada de las bombas.

5.5 PRESENTACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

Si se analizan los resultados obtenidos mediante la aplicación de los tres parámetros de ponderación a la red de ejemplo, se puede observar que los valores de las ponderaciones mediante la longitud (EDI_L) y el volumen (EDI_V) se asemejan considerablemente. No obstante, si se analiza con detalle el planteamiento de los índices de resiliencia para estos dos casos, se puede determinar que un indicador que compara exclusivamente la longitud de la tubería no es representativo a la hora de comparar el déficit de energía entre cada uno de estos elementos.

Bajo diversos criterios de comparación, tanto en el aspecto técnico como económico, una tubería de 1000 metros de longitud y de 100 milímetros de diámetro no puede poseer la misma importancia que una tubería de la misma longitud, pero de 400 milímetros de diámetro dentro de una red de abastecimiento de agua. De esta manera, si se analiza la estructura de cálculo del indicador de resiliencia de déficit energético ponderado por el volumen (EDI_V), este incorpora dentro de su composición ambos parámetros, tanto la longitud como el diámetro, lo cual representa de mejor manera la relevancia de la tubería en el déficit energético del sistema producto del fallo de este elemento. A partir de este punto, para ambos casos de estudio solo

se aplicaron los índices de déficit energético ponderado por el volumen (EDI_V) y aquel ponderado por la longitud y el caudal (EDI_{LF}).

Estos indicadores que permiten analizar y evaluar la resiliencia de los SDA se incorporaron en el modelo informático desarrollado para este TFM y a su vez fueron testeadas previamente a través de redes de agua de prueba, las cuales permiten el comprobar el funcionamiento de los algoritmos de cálculo integrados.

5.5.1 Aplicación de la metodología a la red de BWSN Network 1

Como punto de partida, se realiza un análisis hidráulico previo con el objetivo determinar el correcto funcionamiento de la red y establecer los parámetros mínimos de funcionamiento del sistema. A partir de ello, se observa que la red de BWSN Network 1 presenta consumos independientes de la presión. De esta manera, se establece el valor de la presión mínima requerida en los nudos de consumo de la red el cual corresponde a 15 psi.

Un aspecto importante a considerar es la estructura de las tuberías presentes en el modelo matemático, ya que esta red corresponde a un sistema de abastecimiento de agua, por lo cual existe una diversidad en cuanto a la tipología de las tuberías que forman parte de ella, estas se categorizaron mediante dos grupos;

- Tuberías de distribución: corresponden a aquellas tuberías que presentan diámetros inferiores a 12 pulgadas, las cuales permiten la distribución directa a los nudos de consumo de la red.
- Tuberías de alimentación: corresponden a aquellas tuberías que presentan diámetros superiores a 12 pulgadas, las cuales conectan las fuentes de alimentación como lo son los embalses con los depósitos presentes en la red.

A partir de esta categorización, se pueden identificar un total de 145 tuberías de distribución y 23 tuberías de alimentación. En la Figura 77 se presenta el esquema de las tuberías de distribución, transporte y alimentación que conforman la red BWSN Network 1.

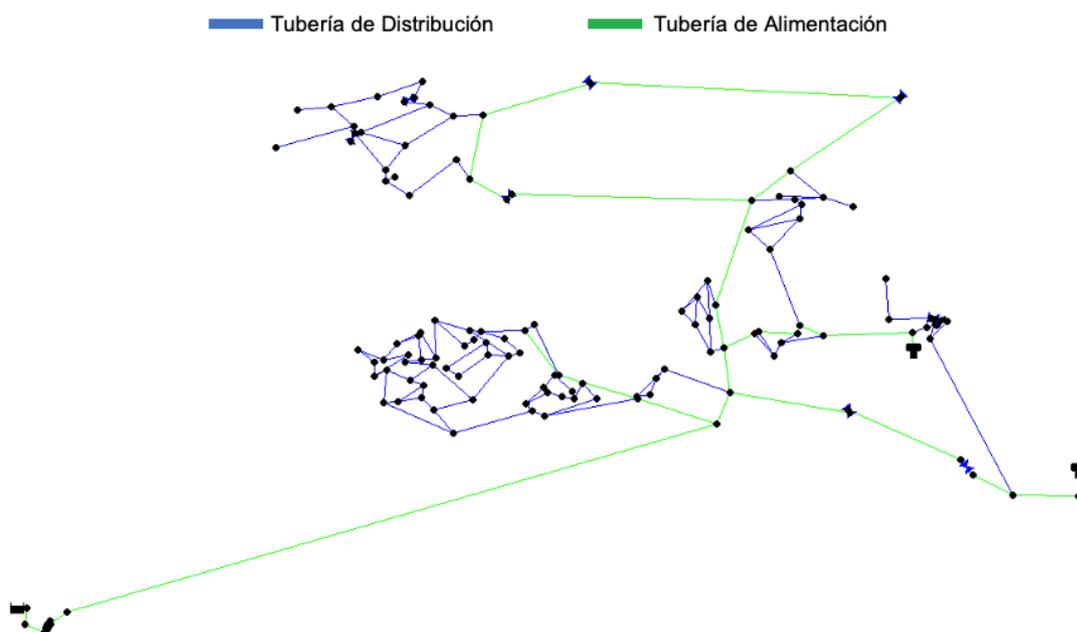


Figura 77. Esquema de las tuberías de distribución y alimentación de la red BWSN Network 1.

A la hora de aplicar la metodología desarrollada en el presente trabajo donde se incorporan los indicadores de resiliencia propuestos, se analizaron dos escenarios o casos de estudio los cuales se programaron de forma conjunta en el modelo informático. El primer escenario el cual se denominó como “Caso A”, consiste en la aplicación del algoritmo de cálculo del EDI sin realizar una reconfiguración de la red al momento de simular la rotura de una de las tuberías. Mientras que el segundo escenario el cual se denominó “Caso B” corresponde a la aplicación del algoritmo de cálculo del EDI incorporando la reestructuración de la red a partir de la rotura de una de las tuberías, donde se da apertura a aquellas tuberías inoperativas, además, de ejecutar la apertura de aquellas válvulas presentes en la red que se encuentran regulando el sistema.

Si se analiza el modelo matemático para la red de estudio, se puede identificar que de un total de 168 tuberías; 165 se encuentran abiertas u operativas, mientras que solo 3 se encuentran cerradas dentro de la configuración original. De la misma manera, se identifica solo una tipología de válvulas presentes en la red las del tipo reductoras de presión (PRV).

Una vez que el modelo matemático de la red de BWSN Network 1 se encuentra cargado en la aplicación desarrollada, se procede a la ejecución del modelo informático para los dos casos de estudio previamente señalados.

a) Aplicación del EDI para el Caso A

En la Tabla 16 se presentan los resultados de la aplicación de la metodología de evaluación de la resiliencia para la red BWSN Network 1, donde se obtiene el valor de los índices de resiliencia EDI_V y EDI_{LF} para cada uno de los 24 instantes de simulación analizados.

Tabla 16. Resultados de la aplicación del EDI_V y el EDI_{LF} para la red BWSN Network 1 (Caso A).

Instante	EDI_V	EDI_{LF}	Instante	EDI_V	EDI_{LF}
00:00	0.4810	0.9615	13:00	0.5001	0.8965
01:00	0.4871	0.9662	14:00	0.5035	0.9029
02:00	0.4947	0.9682	15:00	0.4786	0.8936
03:00	0.4965	0.8992	16:00	0.6724	0.9694
04:00	0.4991	0.8962	17:00	0.6568	0.9760
05:00	0.5012	0.8968	18:00	0.5978	0.9900
06:00	0.4933	0.8946	19:00	0.5967	0.9927
07:00	0.5345	0.9059	20:00	0.5977	0.9907
08:00	0.4991	0.8962	21:00	0.5979	0.9889
09:00	0.5503	0.9098	22:00	0.5977	0.9877
10:00	0.6112	0.9224	23:00	0.5969	0.9885
11:00	0.5100	0.8993	00:00	0.5973	0.9883
12:00	0.4975	0.8957	-	-	-

En la Figura 78 se presentan los resultados correspondientes al cálculo del índice de déficit energético ponderado por el volumen (EDI_V) producto de la rotura de las tuberías para la red de BWSN Network 1, donde se representa de manera gráfica la evolución temporal de este indicador junto con el valor global de la resiliencia obtenido para la red.

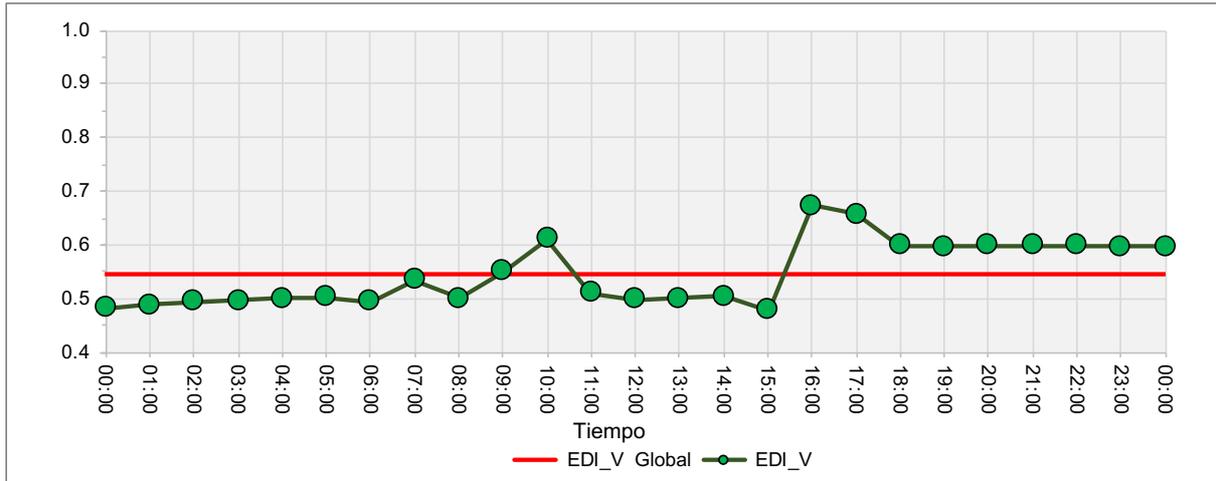


Figura 78. Caso A: Evolución temporal del EDI_V para la red BWSN Network 1.

En la Figura 79 se presentan los resultados correspondientes al cálculo del índice de déficit energético ponderado por la longitud y el caudal (EDI_{LF}) producto de la rotura de las tuberías para la red de BWSN Network 1, donde se representa de manera gráfica la evolución temporal de este indicador junto con el valor global de la resiliencia obtenido para la red.

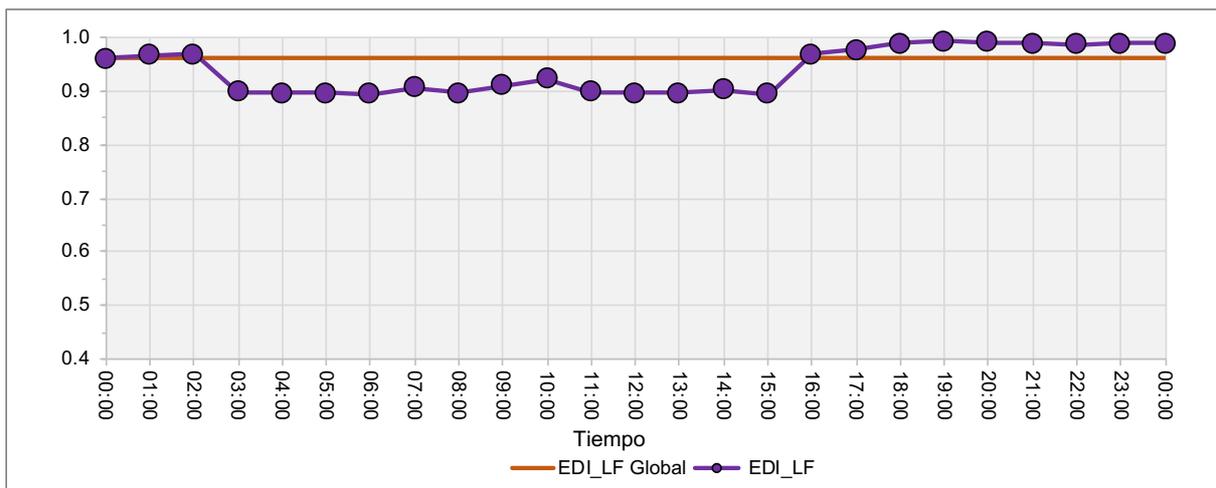


Figura 79. Caso A: Evolución temporal del EDI_{LF} para la red BWSN Network 1.

b) Aplicación del EDI para el Caso B

En la Tabla 17 se presentan los resultados de la aplicación de la metodología de evaluación de la resiliencia para la red BWSN Network 1, donde se obtiene el valor de los índices de resiliencia EDI_V y EDI_{LF} para cada uno de los 24 instantes de simulación analizados.

Tabla 17. Resultados de la aplicación del EDI_V y el EDI_{LF} para la red BWSN Network 1 (Caso B).

Instante	EDI _V	EDI _{LF}	Instante	EDI _V	EDI _{LF}
00:00	0.4810	0.9615	13:00	0.5318	0.9097
01:00	0.4871	0.9662	14:00	0.5349	0.9151
02:00	0.4947	0.9682	15:00	0.5119	0.9070
03:00	0.4965	0.8992	16:00	0.5751	0.9518
04:00	0.4991	0.8961	17:00	0.5533	0.9612
05:00	0.5012	0.8968	18:00	0.4706	0.9831
06:00	0.5255	0.9081	19:00	0.4707	0.9877
07:00	0.5635	0.9176	20:00	0.4701	0.9844
08:00	0.5308	0.9095	21:00	0.4702	0.9813
09:00	0.5781	0.9210	22:00	0.4708	0.9794
10:00	0.6343	0.9311	23:00	0.4706	0.9804
11:00	0.5409	0.9121	00:00	0.4701	0.9804
12:00	0.5294	0.9091	-	-	-

En la Figura 80 se presentan los resultados correspondientes al cálculo del índice de déficit energético ponderado por el volumen (EDI_V) producto de la rotura de las tuberías para la red de BWSN Network 1, donde se representa de manera gráfica la evolución temporal de este indicador junto con el valor global de la resiliencia obtenido para la red.

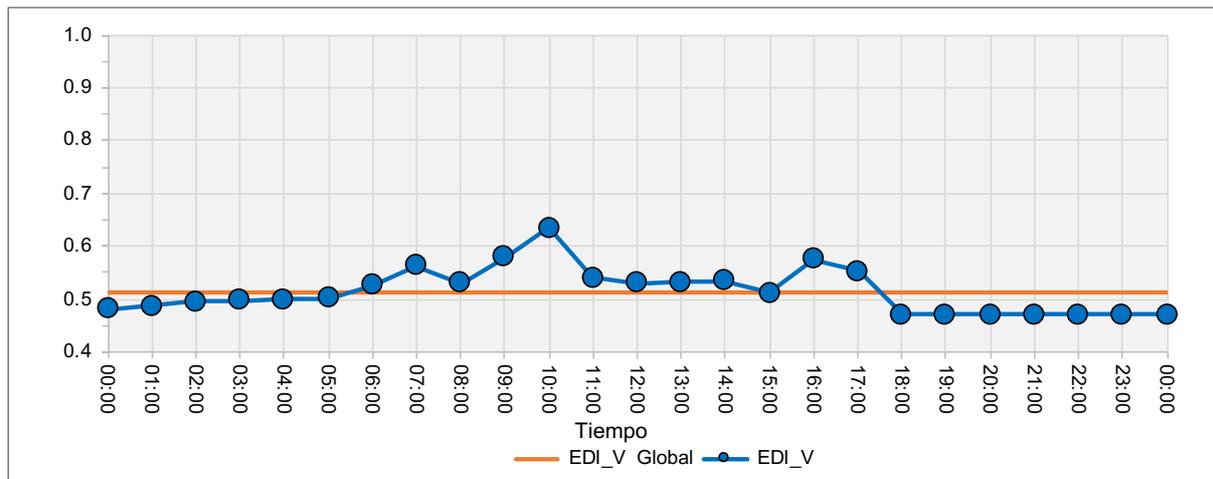


Figura 80. Caso B: Evolución temporal del EDI_V para la red BWSN Network 1.

En la Figura 81 se presentan los resultados correspondientes al cálculo del índice de déficit energético ponderado por la longitud y el caudal (EDI_{LF}) producto de la rotura de las tuberías para la red de BWSN Network 1, donde se representa de manera gráfica la evolución temporal de este indicador junto con el valor global de la resiliencia obtenido para la red.

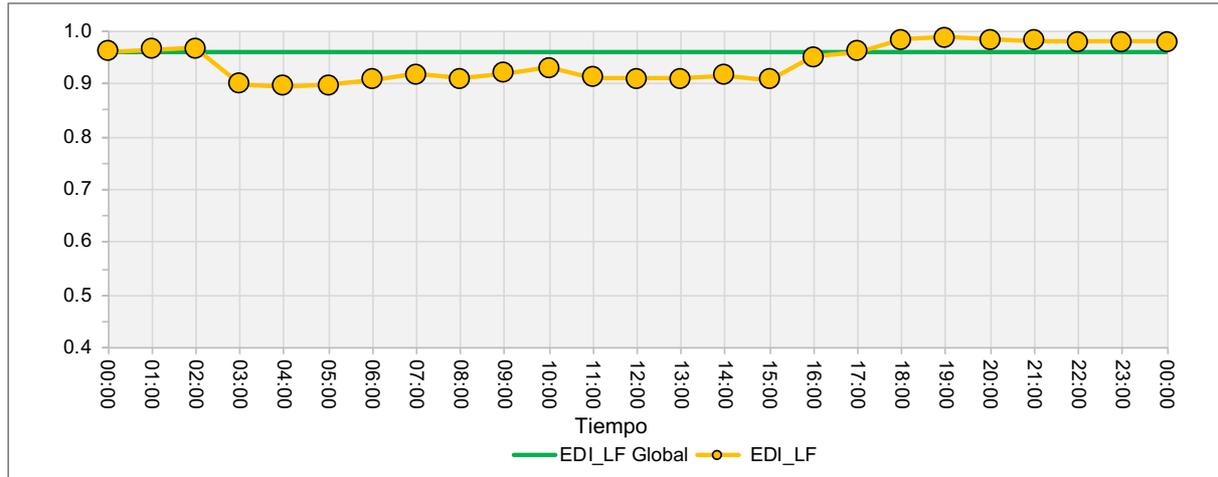


Figura 81. Caso B: Evolución temporal del EDI_{LF} para la red BWSN Network 1.

A partir de los dos escenarios o casos analizados, se realiza una comparativa de los resultados obtenidos para los índices de resiliencia EDI_V y EDI_{LF} posterior a la aplicación de la metodología EDI para el modelo matemático correspondiente a la red BWSN Network 1. De esta manera, en la Tabla 18 se presenta el análisis estadístico de los resultados, donde se lleva a cabo la representación del porcentaje de mejora de los resultados asociados al cálculo de la resiliencia del sistema.

Tabla 18. Resultados de la aplicación de los EDI para la red de BWSN Network 1.

Instante	EDI_V			EDI_{LF}		
	Caso A	Caso B	% de Mejora	Caso A	Caso B	% de Mejora
00:00	0.4810	0.4810	0.00%	0.9615	0.9615	0.00%
01:00	0.4871	0.4871	0.00%	0.9662	0.9662	0.00%
02:00	0.4947	0.4947	0.00%	0.9682	0.9682	0.00%
03:00	0.4965	0.4965	0.00%	0.8992	0.8992	0.00%
04:00	0.4991	0.4991	0.00%	0.8962	0.8961	- 0.01%
05:00	0.5012	0.5012	0.00%	0.8968	0.8968	0.00%
06:00	0.4933	0.5255	+ 3.22%	0.8946	0.9081	+ 1.35%
07:00	0.5345	0.5635	+ 2.90%	0.9059	0.9176	+ 1.17%
08:00	0.4991	0.5308	+ 3.17%	0.8962	0.9095	+ 1.33%
09:00	0.5503	0.5781	+ 2.78%	0.9098	0.9210	+ 1.12%
10:00	0.6112	0.6343	+ 2.31%	0.9224	0.9311	+ 0.87%
11:00	0.5100	0.5409	+ 3.09%	0.8993	0.9121	+ 1.28%
12:00	0.4975	0.5294	+ 3.19%	0.8957	0.9091	+ 1.34%
13:00	0.5001	0.5318	+ 3.17%	0.8965	0.9097	+ 1.32%
14:00	0.5035	0.5349	+ 3.14%	0.9029	0.9151	+ 1.22%
15:00	0.4786	0.5119	+ 3.33%	0.8936	0.9070	+ 1.34%
16:00	0.6724	0.5751	- 9.73%	0.9694	0.9518	- 1.76%
17:00	0.6568	0.5533	- 10.35%	0.9760	0.9612	- 1.48%
18:00	0.5978	0.4706	- 12.72%	0.9900	0.9831	- 0.69%
19:00	0.5967	0.4707	- 12.60%	0.9927	0.9877	- 0.50%
20:00	0.5977	0.4701	- 12.76%	0.9907	0.9844	- 0.63%
21:00	0.5979	0.4702	- 12.77%	0.9889	0.9813	- 0.76%
22:00	0.5977	0.4708	- 12.69%	0.9877	0.9794	- 0.83%
23:00	0.5969	0.4706	- 12.63%	0.9885	0.9804	- 0.81%
00:00	0.5973	0.4701	- 12.72%	0.9883	0.9804	- 0.79%

Se puede observar que para el EDI_V , los resultados obtenidos entre las 00:00 hrs y las 05:00 hrs no presentan una variación significativa, por lo cual, la realización de maniobras de reestructuración de la red no afecta a la resiliencia del sistema. Por otra parte, los resultados obtenidos entre las 06:00 hrs y las 15:00 hrs presentan una mejora en la resiliencia del sistema desde un 2.31% hasta un 3.33%, lo cual indica que la realización de las maniobras de reestructuración permite mitigar los efectos relacionados al déficit energético que trae consigo el fallo de las tuberías de la red. Sin embargo, los resultados obtenidos entre las 16:00 hrs y las 24:00 hrs presentan un declive significativo, disminuyendo considerablemente la resiliencia del sistema entre un 9.73% y un 12.77%, por lo cual, la realización de maniobras de reestructuración de la red puede llegar a ser perjudicial para el sistema al momento de hacer frente al fallo de las tuberías de la red.

Si se analizan los resultados obtenidos para el EDI_{LF} , estos se comportan de manera similar que para el EDI_V . Durante el periodo de simulación entre las 00:00 hrs y las 05:00 hrs no presentan una variación significativa. Por otra parte, los resultados obtenidos entre las 06:00 hrs y las 15:00 hrs presentan una mejora en la resiliencia del sistema desde un 0.87% hasta un 1.35%. Sin embargo, los resultados obtenidos entre las 16:00 hrs y las 24:00 hrs presentan un declive significativo, disminuyendo la resiliencia del sistema entre un 0.50% y un 1.76%.

Para interpretar estos resultados, específicamente en los intervalos finales, la disminución en la resiliencia viene dado por el descenso del nivel de agua en los depósitos, los cuales se vacían producto de la alta demanda de suministro y sumado al colapso de las tuberías de la red provocan que el déficit energético aumente.

Con el objetivo de visualizar de manera gráfica los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios analizados, en la Figura 82 se presenta la evolución temporal del índice de déficit energético ponderado por el volumen (EDI_V) producto de la rotura de las tuberías en la red de BWSN Network 1 para los casos de aplicación A y B. Así mismo, en la Figura 83 se presenta la evolución temporal del índice de déficit energético ponderado por la longitud y el caudal (EDI_{LF}) producto de la rotura de las tuberías en la red de BWSN Network 1 para los casos de aplicación A y B.

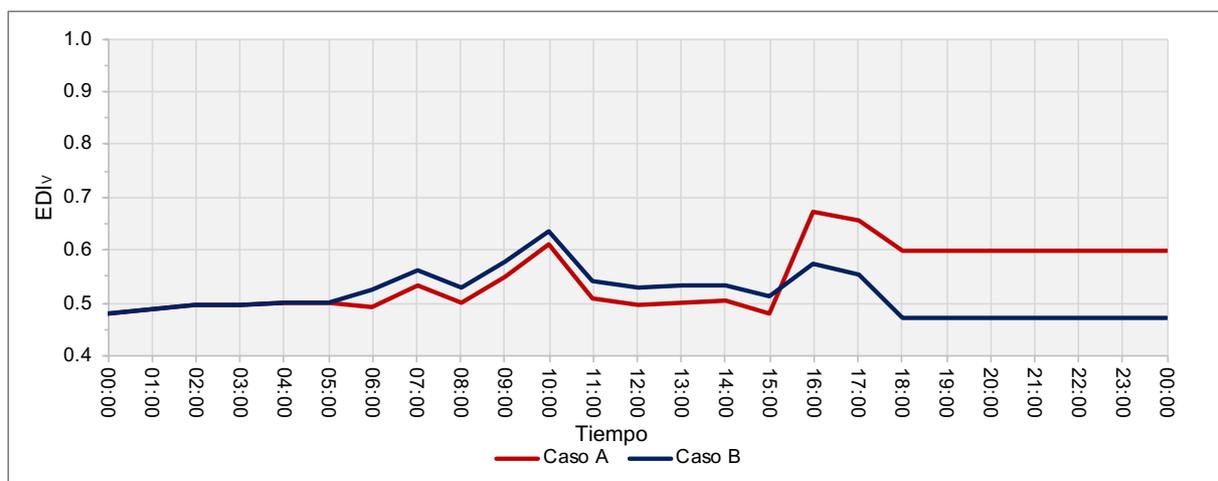


Figura 82. Comparativa de los resultados de aplicación del EDI_V para los casos A y B en la red de BWSN Network 1.

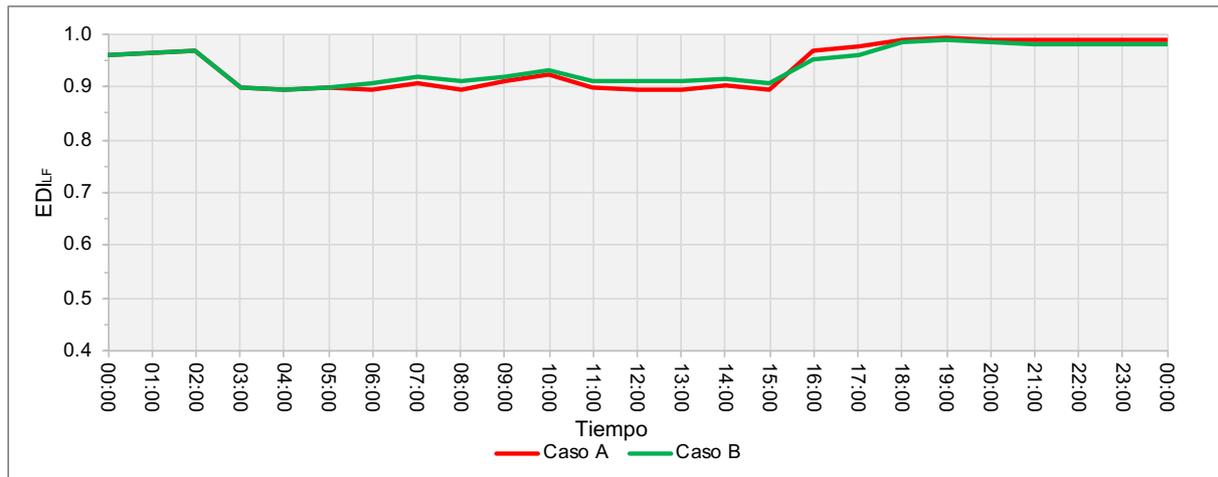


Figura 83. Comparativa de los resultados de aplicación del EDI_{LF} para los casos A y B en la red de BWSN Network 1.

5.5.2 Aplicación de la metodología a la red de Santa Marta Sur

Para la aplicación de la metodología desarrollada a la red Santa Marta Sur se procede de la misma manera que para la red BWSN Network 1, donde en primera instancia se realiza un análisis hidráulico para determinar el correcto funcionamiento del modelo matemático de la red y establecer los parámetros mínimos de funcionamiento del sistema. A partir de ello, se observa que la red de Santa Marta Sur presenta consumos independientes de la presión. De esta manera, se establece la presión mínima requerida para los nudos de consumo en 15 mca, que corresponde a la presión pactada por la empresa gestora del abastecimiento como parte de la estructura administrativa de la ciudad.

Un aspecto importante a considerar es la estructura de las tuberías presentes en el modelo matemático, ya que esta red corresponde a un sistema de abastecimiento de agua real, por lo cual existe una gran diversidad en cuanto a la tipología de las tuberías que forman parte de la red, estas se categorizaron mediante tres grupos;

- Tuberías de distribución: corresponden a aquellas tuberías que presentan diámetros inferiores a 152 milímetros, las cuales permiten la distribución directa a los nudos de consumo de la red.
- Tuberías de transporte: hace referencia a aquellas tuberías que presentan diámetros entre 152 y 400 milímetros, las cuales se destinan a la distribución desde las fuentes internas como lo son los depósitos hacia cada uno de los sectores que presenta la red.
- Tuberías de alimentación: corresponden a aquellas tuberías que presentan diámetros superiores a 400 milímetros, las cuales conectan las fuentes de alimentación como lo son los embalses con los depósitos presentes en la red.

A partir de esta categorización, se pueden identificar un total de 1794 tuberías de distribución, 350 tuberías de transporte y 194 tuberías de alimentación. En la Figura 84 presenta el esquema de las tuberías de distribución, transporte y alimentación que conforman la red Santa Marta Sur.

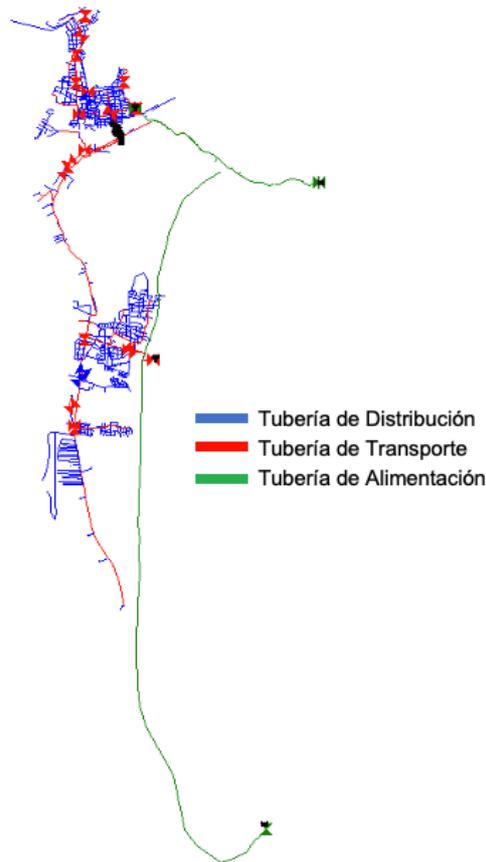


Figura 84. Esquema de las tuberías de distribución, transporte y alimentación de la red Santa Marta Sur.

A la hora de aplicar la metodología desarrollada en el presente trabajo donde se incorporan los indicadores de resiliencia propuestos, se analizaron dos escenarios o casos de estudio los cuales se programaron de forma conjunta en el modelo informático. El primer escenario el cual se denominó como “Caso A”, consiste en la aplicación del algoritmo de cálculo del EDI sin realizar una reconfiguración de la red al momento de simular la rotura de una de las tuberías. Mientras que el segundo escenario el cual se denominó “Caso B” corresponde a la aplicación del algoritmo de cálculo del EDI incorporando la reestructuración de la red a partir de la rotura de una de las tuberías, donde se da apertura a aquellas tuberías inoperativas, además, de ejecutar la apertura de aquellas válvulas presentes en la red que se encuentran regulando el sistema.

Si se analiza el modelo matemático para la red de estudio, se puede identificar que de un total de 2311 tuberías; 2224 de encuentran abiertas u operativas, mientras que solo 84 se encuentran cerradas dentro de la configuración original. De la misma manera, a partir de las válvulas presentes en la red se identifican dos tipologías, las cuales se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19. Tipología de válvulas para la red Santa Marta Sur.

Válvula	ID	Total
Limitadora de Caudal	FCV	4
Reductora de Presión	PRV	23

Una vez el modelo matemático de la red de Santa Marta Sur se encuentra cargado en la aplicación desarrollada, se procede a la ejecución del modelo informático para los dos casos de estudio previamente señalados.

a) Aplicación del EDI para el Caso A

En la Tabla 20 se presentan los resultados de la aplicación de la metodología de evaluación de la resiliencia para la red Santa Marta Sur, donde se obtiene el valor de los índices de resiliencia EDI_V y EDI_{LF} para cada uno de los 24 instantes de simulación analizados.

Tabla 20. Resultados de la aplicación del EDI_V y el EDI_{LF} para la red Santa Marta Sur (Caso A).

Instante	EDI_V	EDI_{LF}	Instante	EDI_V	EDI_{LF}
00:00	0.9957	0.9604	13:00	0.8292	0.7802
01:00	0.9958	0.9635	14:00	0.8338	0.8035
02:00	0.9955	0.9562	15:00	0.8139	0.7010
03:00	0.9934	0.9042	16:00	0.8206	0.7357
04:00	0.9916	0.8583	17:00	0.8165	0.7142
05:00	0.9903	0.8230	18:00	0.8260	0.7648
06:00	0.9901	0.8296	19:00	0.8184	0.7240
07:00	0.9895	0.8019	20:00	0.8360	0.8168
08:00	0.9899	0.8221	21:00	0.8411	0.8402
09:00	0.8377	0.8241	22:00	0.8543	0.8873
10:00	0.8368	0.8155	23:00	0.8555	0.8886
11:00	0.8216	0.7401	00:00	0.8633	0.9431
12:00	0.8121	0.6933	-	-	-

En la Figura 85 se presentan los resultados correspondientes al cálculo del índice de déficit energético ponderado por el volumen (EDI_V) producto de la rotura de las tuberías para la red de Santa Marta Sur, donde se representa de manera gráfica la evolución temporal de este indicador junto con el valor global de la resiliencia obtenido para la red.

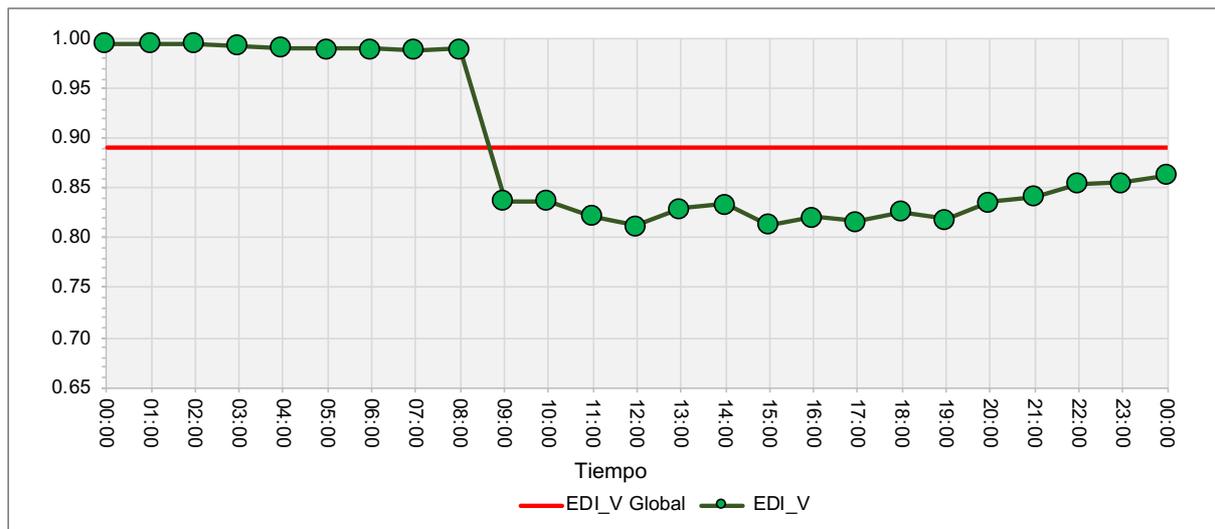


Figura 85. Caso A: Evolución temporal del EDI_V para la red Santa Marta Sur.

En la Figura 86 se presentan los resultados correspondientes al cálculo del índice de déficit energético ponderado por la longitud y el caudal (EDI_{LF}) producto de la rotura de las tuberías para la red de Santa Marta Sur, donde se representa de manera gráfica la evolución temporal de este indicador junto con el valor global de la resiliencia obtenido para la red.

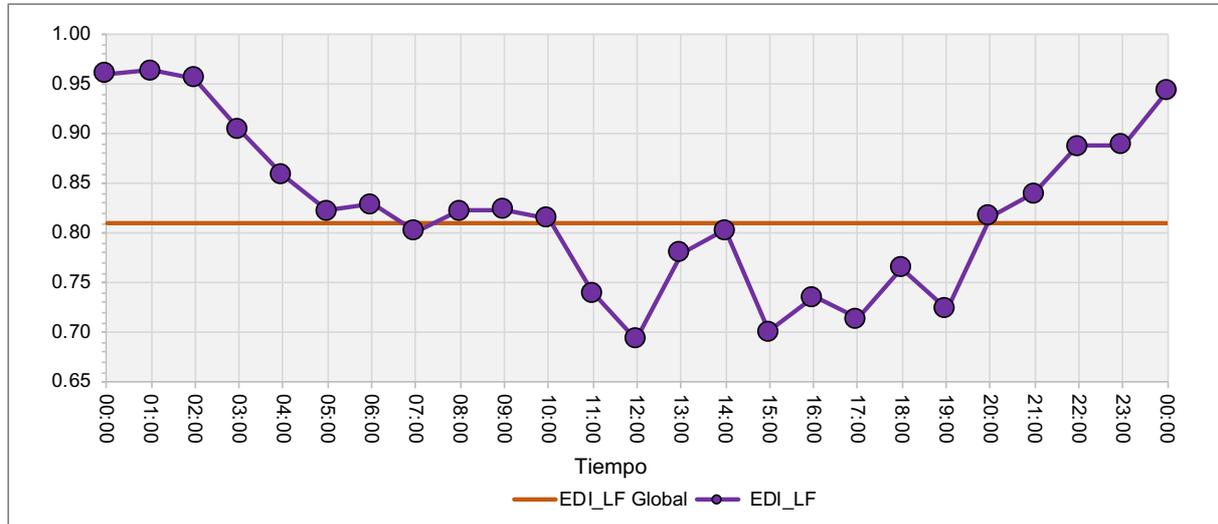


Figura 86. Caso A: Evolución temporal del EDI_{LF} para la red Santa Marta Sur.

b) Aplicación del EDI para el Caso B

En la Tabla 21 se presentan los resultados de la aplicación de la metodología de evaluación de la resiliencia para la red Santa Marta Sur, donde se obtiene el valor de los índices de resiliencia EDI_v y EDI_{LF} para cada uno de los 24 instantes de simulación analizados.

Tabla 21. Resultados de la aplicación del EDI_v y el EDI_{LF} para la red Santa Marta Sur (Caso B).

Instante	EDI_v	EDI_{LF}	Instante	EDI_v	EDI_{LF}
00:00	0.9995	0.9938	13:00	0.9644	0.9742
01:00	0.9995	0.9951	14:00	0.9654	0.9748
02:00	0.9994	0.9934	15:00	0.9334	0.9615
03:00	0.9992	0.9870	16:00	0.9625	0.9731
04:00	0.9990	0.9827	17:00	0.9607	0.9717
05:00	0.9989	0.9795	18:00	0.9490	0.9691
06:00	0.9988	0.9763	19:00	0.9430	0.9666
07:00	0.9957	0.9772	20:00	0.9660	0.9752
08:00	0.9986	0.9716	21:00	0.9588	0.9731
09:00	0.9629	0.9731	22:00	0.9668	0.9782
10:00	0.9591	0.9701	23:00	0.9677	0.9801
11:00	0.9579	0.9692	00:00	0.9728	0.9872
12:00	0.9475	0.9552	-	-	-

En la Figura 87 se presentan los resultados correspondientes al cálculo del índice de déficit energético ponderado por el volumen (EDI_v) producto de la rotura de las tuberías para la red de Santa Marta Sur, donde se representa de manera gráfica la evolución temporal de este indicador junto con el valor global de la resiliencia obtenido para la red.

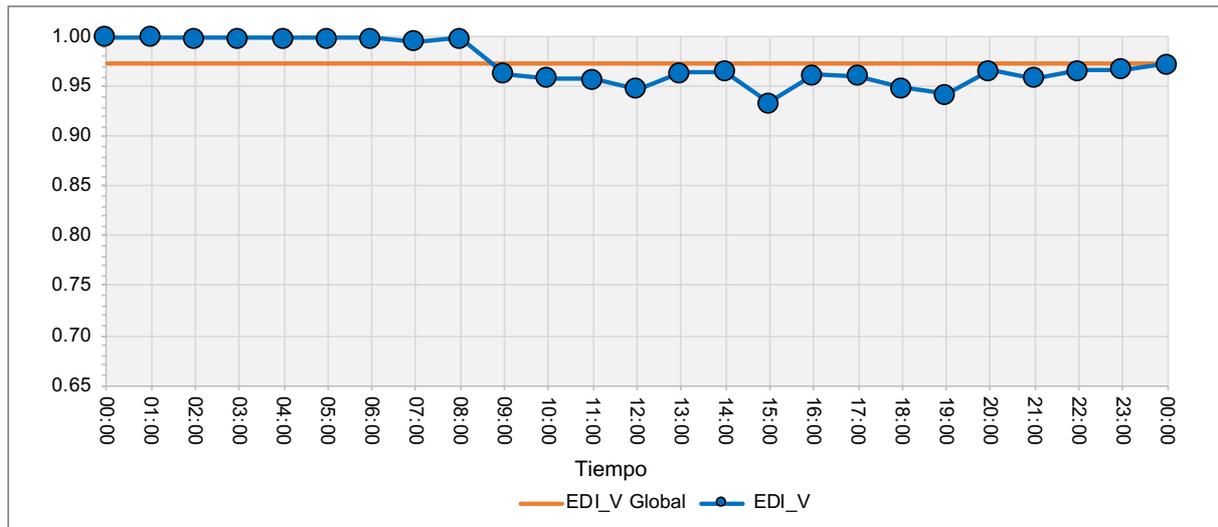


Figura 87. Caso B: Evolución temporal del EDI_V para la red Santa Marta Sur.

En la Figura 88 se presentan los resultados correspondientes al cálculo del índice de déficit energético ponderado por la longitud y el caudal (EDI_{LF}) producto de la rotura de las tuberías para la red de Santa Marta Sur, donde se representa de manera gráfica la evolución temporal de este indicador junto con el valor global de la resiliencia obtenido para la red.

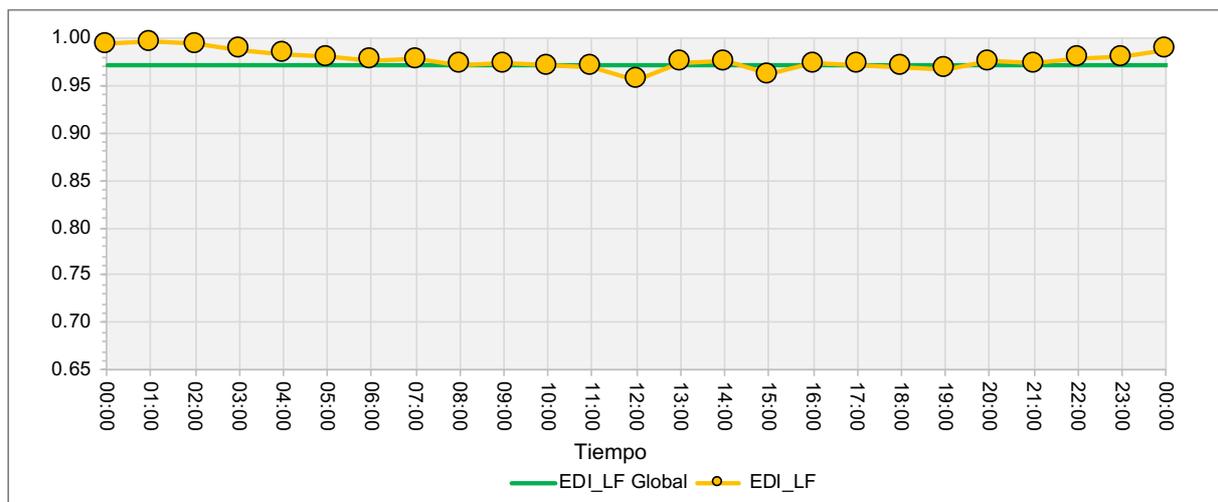


Figura 88. Caso B: Evolución temporal del EDI_{LF} para la red Santa Marta Sur.

A partir de los dos escenarios o casos analizados, se realiza una comparativa de los resultados obtenidos para los índices de resiliencia EDI_V y EDI_{LF} posterior a la aplicación de la metodología EDI para el modelo matemático correspondiente a la red Santa Marta Sur. De esta manera, en la Tabla 22 se presenta el análisis estadístico de los resultados, donde se lleva a cabo la representación del porcentaje de mejora de los resultados asociados al cálculo de la resiliencia del sistema.

Tabla 22. Resultados de la aplicación del EDI a la red de Santa Marta Sur.

Instante	EDI _V			EDI _{LF}		
	Caso A	Caso B	% de Mejora	Caso A	Caso B	% de Mejora
00:00	0.9957	0.9604	+ 0.38%	0.9604	0.9938	+ 3.34%
01:00	0.9958	0.9635	+ 0.37%	0.9635	0.9951	+ 3.16%
02:00	0.9955	0.9562	+ 0.39%	0.9562	0.9934	+ 3.72%
03:00	0.9934	0.9042	+ 0.58%	0.9042	0.9870	+ 8.28%
04:00	0.9916	0.8583	+ 0.74%	0.8583	0.9827	+ 12.44%
05:00	0.9903	0.8230	+ 0.86%	0.8230	0.9795	+ 15.65%
06:00	0.9901	0.8296	+ 0.87%	0.8296	0.9763	+ 14.67%
07:00	0.9895	0.8019	+ 0.62%	0.8019	0.9772	+ 17.53%
08:00	0.9899	0.8221	+ 0.87%	0.8221	0.9716	+ 14.95%
09:00	0.8377	0.8241	+ 12.52%	0.8241	0.9731	+ 14.90%
10:00	0.8368	0.8155	+ 12.23%	0.8155	0.9701	+ 15.46%
11:00	0.8216	0.7401	+ 13.63%	0.7401	0.9692	+ 22.91%
12:00	0.8121	0.6933	+ 13.54%	0.6933	0.9552	+ 26.19%
13:00	0.8292	0.7802	+ 13.52%	0.7802	0.9742	+ 19.40%
14:00	0.8338	0.8035	+ 13.16%	0.8035	0.9748	+ 17.13%
15:00	0.8139	0.7010	+ 11.95%	0.7010	0.9615	+ 26.05%
16:00	0.8206	0.7357	+ 14.19%	0.7357	0.9731	+ 23.74%
17:00	0.8165	0.7142	+ 14.42%	0.7142	0.9717	+ 25.75%
18:00	0.8260	0.7648	+ 12.30%	0.7648	0.9691	+ 20.43%
19:00	0.8184	0.7240	+ 12.46%	0.7240	0.9666	+ 24.26%
20:00	0.8360	0.8168	+ 13.00%	0.8168	0.9752	+ 15.84%
21:00	0.8411	0.8402	+ 11.77%	0.8402	0.9731	+ 13.29%
22:00	0.8543	0.8873	+ 11.25%	0.8873	0.9782	+ 9.09%
23:00	0.8555	0.8886	+ 11.22%	0.8886	0.9801	+ 9.15%
00:00	0.8633	0.9431	+ 10.95%	0.9431	0.9872	+ 4.41%

Se puede observar que para el EDI_V, los resultados obtenidos para cada uno de los 24 periodos de tiempo simulados presentan una mejora significativa en la resiliencia del sistema desde un 0.37% hasta un 14.42%, lo cual indica que la realización de las maniobras de reestructuración permite mitigar los efectos relacionados al déficit energético que trae consigo el fallo de las tuberías de la red.

Si se analizan los resultados obtenidos para el EDI_{LF}, estos se comportan de manera similar que para el EDI_V, donde estos resultados presentan una mejora significativa en la resiliencia del sistema desde un 3.16% hasta un 26.19%.

Con el objetivo de visualizar de manera gráfica los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios analizados, en la Figura 89 se presenta la evolución temporal del índice de déficit energético ponderado por el volumen (EDI_V) producto de la rotura de las tuberías en la red de Santa Marta Sur para los casos de aplicación A y B. Así mismo, en la Figura 90 se presenta la evolución temporal del índice de déficit energético ponderado por la longitud y el caudal (EDI_{LF}) producto de la rotura de las tuberías en la red de Santa Marta Sur para los casos de aplicación A y B.

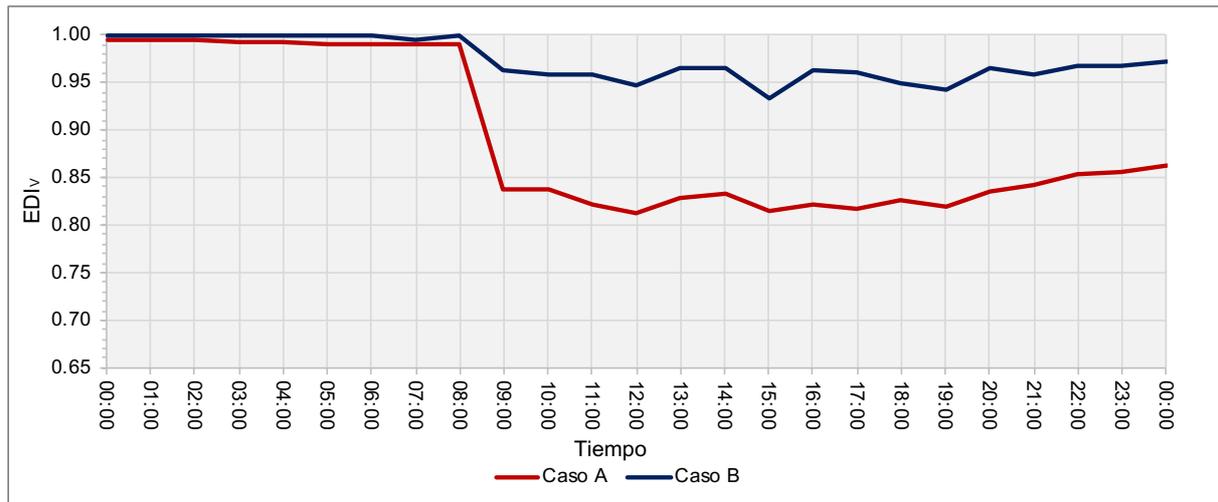


Figura 89. Comparativa de los resultados de aplicación del EDI_v para los casos A y B en la red de Santa Marta Sur.

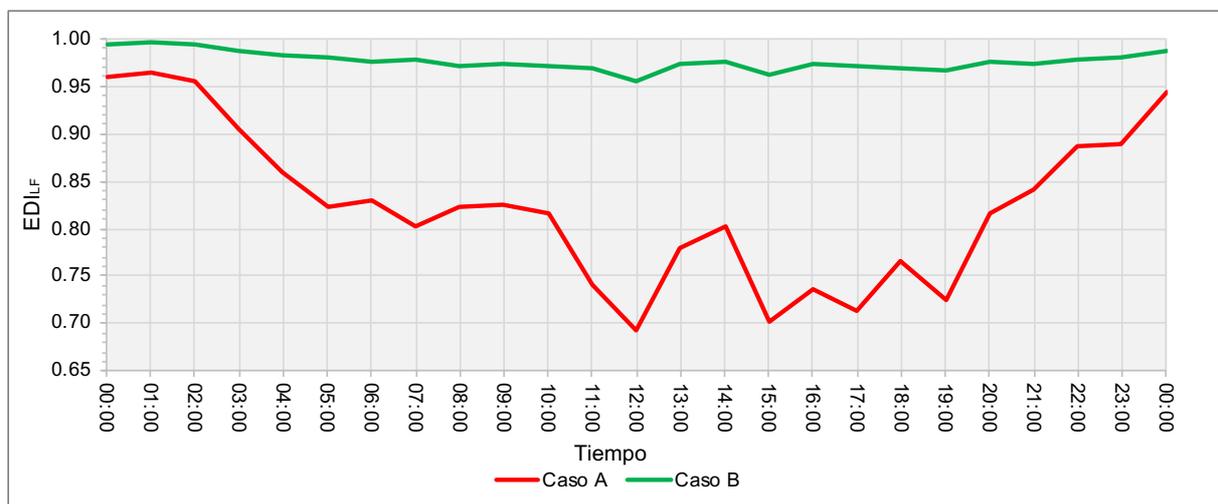


Figura 90. Comparativa de los resultados de la aplicación del EDI_{LF} para los casos A y B en la red de Santa Marta Sur.

5.6 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos para ambos casos de estudio y la comparación realizada para los dos escenarios planteados han arrojado soluciones de interés. Es cierto que estos indicadores de resiliencia, como lo son el EDI_v y el EDI_{LF}, son el resultado de una serie de análisis y propuestas que permitan determinar, bajo un parámetro estimativo, la resiliencia de un sistema de abastecimiento de agua al enfrentarlo de manera controlada a eventos que son propensos a producirse en la vida real y que alteran el normal funcionamiento de este. Sin embargo, la simulación de diversos escenarios permite visualizar el comportamiento de la red de manera dinámica y pone a prueba el análisis interno que se desarrolla y se plantea a través de estos indicadores de resiliencia.

Una vez aplicada la metodología propuesta a las redes BWSN Network 1 y Santa Marta Sur, y al simular la rotura de las tuberías de la red, se observa que en aquellos periodos donde los consumos son elevados, la realización de una reestructuración de la red resulta ser



beneficioso, ya que el déficit energético disminuye y por consiguiente la resiliencia aumenta. Por el contrario, en aquellos periodos donde los consumos son menores, realizar una reestructuración de la red no representa un beneficio significativo para la resiliencia del sistema. Por lo cual, esta metodología permite identificar aquellas franjas horarias donde, el ejecutar maniobras de apertura y cierre tanto de tuberías como válvulas operativas dentro del sistema, sí conlleve un beneficio sustancial para hacer frente ante eventos inesperados al que se pueda ver amenazada la red.

De los resultados obtenidos para la red BWSN Network 1, si se analiza la aplicación del EDI_V , se observa que la variación de la resiliencia global para el sistema disminuye en un 3.15% al comparar ambos escenarios presentados, donde se puede identificar que ejecutar una reestructuración de la red no trae consigo beneficios para la resiliencia del sistema. De manera análoga, si se analiza la aplicación del EDI_{LF} , se observa que la variación de la resiliencia global para el sistema disminuye en un 0.20% al comparar ambos escenarios presentados, pudiendo concluirse que al llevar a cabo una reestructuración de la red no trae consigo un beneficio significativo para la resiliencia del sistema.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos para la red Santa Marta Sur, se observa que tras la aplicación del EDI_V , la variación de la resiliencia global para el sistema aumenta en un 8.31%. Al comparar ambos escenarios se puede concluir que ejecutar una reestructuración de la red sí trae consigo beneficios para la resiliencia del sistema. De la misma manera, tras la aplicación del EDI_{LF} , se observa que la variación de la resiliencia global para el sistema es aún más significativa, aumentando ésta en un 16.10%.

CAPÍTULO VI:

CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

6.1 CONCLUSIONES

Una vez finalizado el presente trabajo y el propio desarrollo de este documento, se han extraído las siguientes conclusiones:

- La realización de este documento ha proporcionado una descripción general del enfoque cuantitativo para medir la resiliencia de un SDA, donde se puede concluir que no existe una definición consistente y totalmente aprobada, ni una medida única para evaluarla. Luego de llevar a cabo una extensa búsqueda bibliográfica, se seleccionaron y analizaron nueve indicadores que han sido utilizados en diversas investigaciones para el diseño, análisis y la toma de decisiones. En particular, estas medidas poseen una estructura de cálculo acotada y responden a criterios de evaluación basados en atributos, por lo cual no evidencian a una aplicabilidad e interconexión específica entre ellas.
- La construcción y el desarrollo de una herramienta informática que permita evaluar en términos de resiliencia un SDA, ya sea en régimen permanente como en periodo extendido, es un proceso que por más simple que parezca, requiere una enorme cantidad de horas de programación para llevarlo a cabo, por ende, tomar la decisión de desarrollar una herramienta computacional no es tarea fácil. Trabajar con la Toolkit de EPANET en su versión 2.2.0 y poner a prueba las funciones y operaciones que esta incorpora, sin duda abre la puerta a una variedad ilimitada de análisis e investigaciones

relacionados a los SDA, tanto para la comunidad científica como para las compañías gestoras de los abastecimientos, ya sea en la parte hidráulica como en la calidad de agua.

- La valoración de la resiliencia de un SDA mediante una metodología que integra el análisis energético como parámetro característico, puede convertirse en una herramienta de ayuda para la toma de decisiones, brindando una solución eficiente y la cual no requiere una alta carga de cálculo computacional. A partir de la aplicación de la metodología del PREI se puede identificar que dependiendo del tamaño de la red que se analice, la configuración y cantidad óptima de dispositivos a instalar varía considerablemente, sin embargo, la cantidad final de dispositivos a instalar va a depender en muchas ocasiones de la decisión netamente humana.
- El proceso analítico para estimar la resiliencia de un SDA a través de la metodología EDI, permite identificar la existencia de un déficit energético el cual no puede ser suministrado a través de la red. Este escenario se presenta principalmente en aquellos puntos que son considerados como ramales o nudos terminales, donde la demanda no puede ser suministrada debido a que no existe redundancia de la red, por lo cual este déficit energético no puede ser compensado de manera directa. Por ende, la resiliencia del sistema siempre va a ser inferior al valor máximo estimado, ya sea en menor o mayor medida condicionada por la presencia de nudos terminales dentro de la estructura de la red.
- En general, las medidas de resiliencia, tanto desarrolladas como propuestas, proveen de una perspectiva complementaria sobre la fiabilidad hidráulica de los SDA. Una de las principales aportaciones de este trabajo es la propuesta de un algoritmo de cálculo integrado para cada indicador de resiliencia, logrando con esto, complementar la evaluación de cada uno de periodos de simulación con un valor característico para el sistema.
- Finalmente, mediante el desarrollo de este documento se evidenció que la intervención humana, siendo un elemento invariante dentro de la administración de procesos en un SDA, puede ser considerada como una fuerza dominante que podría modificar directa o indirectamente la resiliencia.

6.2 DESARROLLOS FUTUROS

Existen algunos aspectos mencionados durante la elaboración del presente documento, los cuales pueden ser tomados como punto de partida para futuros estudios o como simples recomendaciones a la hora de continuar sobre la misma línea desarrollada. A partir de ello, se pueden destacar los siguientes puntos:

- Extender el alcance de la programación del algoritmo de cálculo del PREI para ser aplicado a sistemas de abastecimiento que presenten consumos dependientes de la presión.
- Proponer el desarrollo de un indicador de resiliencia que integre dentro del algoritmo de cálculo la posibilidad de evaluar de manera integrada tanto el déficit como el excedente de energía en la red producto del fallo o rotura de las tuberías que conforman el sistema de abastecimiento.
- Integrar el factor económico como parámetro preponderante en los algoritmos de cálculo de la resiliencia para los indicadores PREI y EDI.



- Plantear diferentes tipologías de maniobras de reestructuración de una red de abastecimiento que puedan ser aplicadas de manera gradual e incluirlas en el algoritmo de cálculo del EDI.
- Estudiar la variación de la resiliencia entre los intervalos de análisis durante una simulación dinámica, con el objetivo de parametrizar la fórmula de cálculo de la resiliencia global del sistema.



CAPÍTULO VII:

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atkinson, S., Farmani, R., Memon, F. A., & Butler, D. (2014). Reliability indicators for water distribution system design: Comparison. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(2), 160–168. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000304](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000304)
- Baños, R., Reca, J., Martínez, J., Gil, C., & Márquez, A. L. (2011). Resilience Indexes for Water Distribution Network Design: A Performance Analysis Under Demand Uncertainty. *Water Resources Management*, 25(10), 2351–2366. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9812-3>
- Bragalli, C., D'Ambrosio, C., Lee, J., Lodi, A., & Toth, P. (2012). On the optimal design of water distribution networks: A practical MINLP approach. *Optimization and Engineering*, 13(2), 219–246. <https://doi.org/10.1007/s11081-011-9141-7>
- Bragalli, C., D'Ambrosio, C., Lee, J., Lodi, A., & Toth, P. (2006). An MINLP solution method for a water network problem. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 4168 LNCS, 696–707. https://doi.org/10.1007/11841036_62
- Butler, D., Farmani, R., Fu, G., Ward, S., Diao, K., & Astaraie-Imani, M. (2014). A new approach to urban water management: Safe and sure. *Procedia Engineering*, 89, 347–354. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.198>
- Cabrera, E., Pardo, M. Á., Cabrera Jr., E., & Cobacho, R. (2010). Agua y energía en España. Un reto complejo y fascinante. *Ingeniería Del Agua*, 17(3), 235–246. <https://doi.org/10.4995/ia.2010.2976>
- Clark, R. M., Rossman, L. A., and Grayman, W. M. (1995). *Modeling Chlorine Residuals in Drinking-Water Distribution Systems*. 120(4), 803–820.
- Consejo de la Unión Europea. (2008). Directiva 2008/114/CE del Consejo de Europa sobre la identificación y designación de infraestructuras críticas europeas. *Diario Oficial de La*

- Unión Europea, 75–82. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32008L0114:ES:NOT>
- Córdova, M., Célleri, R., Shellito, C. J., Orellana-Alvear, J., Abril, A., & Carrillo-Rojas, G. (2016). Near-surface air temperature lapse rate over complex terrain in the Southern Ecuadorian Andes: Implications for temperature mapping. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 48(4), 673–684. <https://doi.org/10.1657/AAAR0015-077>
- DANE. (2020). Proyecciones de población 2018-2023. *Dane*, 4, 1–11.
- Di Nardo, A., Di Natale, M., Santonastaso, G. F., Tzatchkov, V. G., & Alcocer-Yamanaka, V. H. (2013). Water Network Sectorization based on a genetic algorithm and minimum dissipated power paths. *Water Science and Technology: Water Supply*, 13(4), 951–957. <https://doi.org/10.2166/ws.2013.059>
- Ferrer, J., Daniel, P., García, A., Barat, R., Joaquín, B., Sevilla, S., & Ojeda, E. L. (2016). *Huella Energética en el Ciclo Integral del Agua en la Comunidad de Madrid*.
- Fujiwara, O., & Tung, H. D. (1991). Reliability improvement for water distribution networks through increasing pipe size. *Water Resources Research*, 27(7), 1395–1402. <https://doi.org/10.1029/91WR00882>
- Gheisi, A., & Naser, G. (2015). Multistate Reliability of Water-Distribution Systems: Comparison of Surrogate Measures. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000529](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000529)
- Haimés, Y. Y., & Hall, W. A. (1977). Sensitivity, responsiveness, stability and irreversibility as multiple objectives in civil systems. *Advances in Water Resources*, 1(2), 71–81. [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(77\)90025-2](https://doi.org/10.1016/0309-1708(77)90025-2)
- Hashimoto, T., Stedinger, J. R., & Loucks, D. P. (1982). Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research*, 18(1), 14–20.
- Hernandez, E., Hoagland, S., & Ormsbee, L. (2016). Water Distribution Database for Research Applications. *World Environmental and Water Resources Congress 2016*, 465–474. <https://doi.org/10.1061/9780784479865.049>
- Holling, C. S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annu.Rev.Ecol.Syst.*, 4, 1–23.
- Iglesias-Castelló, M., Iglesias-Rey, P. L., & Martínez-Solano, F. J. (2018). Potentially recoverable energy assessment in water distribution networks. *WDSA/CCWI Joint Conference Proceedings*.
- Iglesias-Castelló, M., Iglesias-Rey, P. L., Martínez-Solano, F. J., & Fuertes-Miquel, V. S. (2018). Desarrollo de una metodología para la evaluación de la máxima energía recuperable en un sistema de distribución de agua (Development of a Methodology for the Evaluation of Maximum Energy Recovery in a Water Distribution System). *SSRN Electronic Journal*, 86111. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3109104>
- Iglesias-Rey, P. L., Martínez-Solano, F. J., Mora-Meliá, D., & Ribelles-Aguilar, J. V. (2012). *Technics With the Concept of Setpoint Function in Water Network*. 2002, 510–523.
- Jayaram, N., & Srinivasan, K. (2008). Performance-based optimal design and rehabilitation of water distribution networks using life cycle costing. *Water Resources Research*, 44(1). <https://doi.org/10.1029/2006WR005316>
- Jolly, M. D., Lothes, A. D., Sebastian Bryson, L., & Ormsbee, L. (2014). Research Database of Water Distribution System Models. *Journal of Water Resources Planning and*

- Management*, 140(4), 410–416. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000352](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000352)
- Liu, H., Savić, D. A., Kapelan, Z., Creaco, E., & Yuan, Y. (2016). Reliability surrogate measures for water distribution system design: Comparative analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000728](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000728)
- Liu, H., Savić, D., Kapelan, Z., Zhao, M., Yuan, Y., & Zhao, H. (2014). A diameter-sensitive flow entropy method for reliability consideration in water distribution system design. *Water Resources Research*, 50(7), 5597–5610. <https://doi.org/10.1002/2013WR014882>
- Marchi, A., Dandy, G., Wilkins, A., & Rohrlach, H. (2014). Methodology for Comparing Evolutionary Algorithms for Optimization of Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(1), 22–31. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000321](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000321)
- Nan, C., & Sansavini, G. (2017). A quantitative method for assessing resilience of interdependent infrastructures. *Reliability Engineering and System Safety*, 157, 35–53. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.08.013>
- Ostfeld, A., Salomons, E., Ormsbee, L., Uber, J. G., Bros, C. M., Kalungi, P., Burd, R., Zazula-Coetzee, B., Belrain, T., Kang, D., Lansey, K., Shen, H., McBean, E., Yi Wu, Z., Walski, T., Alvisi, S., Franchini, M., Johnson, J. P., Ghimire, S. R., ... McKillop, R. (2012). Battle of the Water Calibration Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(5), 523–532. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000191](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000191)
- Ostfeld, A., Über, J. G., Salomons, E., Berry, J. W., Hart, W. E., Phillips, C. A., Watson, J. P., Dorini, G., Jonkergouw, P., Kapelan, Z., di Pierro, F., Khu, S. T., Savić, D., Eliades, D., Polycarpou, M., Ghimire, S. R., Barkdoll, B. D., Gueli, R., Huang, J. J., ... Walski, T. (2008). The battle of the water sensor networks (BWSN): A design challenge for engineers and algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(6), 556–568. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2008\)134:6\(556\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2008)134:6(556))
- Paez, D. A. (2019). *Developing a Framework for the Reliability Analysis of Water Distribution Systems* [Queen's University. Kingston, Ontario, Canada]. https://qspace.library.queensu.ca/bitstream/handle/1974/26239/Paez_Diego_A_201905_PhD.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Paez, D., & Filion, Y. (2019). Mechanical and Hydraulic Reliability Estimators for Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(11). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001124](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001124)
- Pérez-García, R., Izquierdo, J., & Gutiérrez-Pérez, J. (2010). *Análisis de eventos de contaminación en redes de abastecimiento de agua con técnicas de control estadístico de procesos Editores: ISBN 978-84-89487-32-1* (Issue January).
- Prasad, T. D., & Park, N. S. (2004). Multiobjective genetic algorithms for design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(1), 73–82. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2004\)130:1\(73\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:1(73))
- Raad, D. N., Sinske, A. N., & van Vuuren, J. H. (2010). Comparison of four reliability surrogate measures for water distribution systems design. *Water Resources Research*, 46(5), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2009wr007785>
- Reca, J., & Martínez, J. (2006). Genetic algorithms for the design of looped irrigation water distribution networks. *Water Resources Research*, 42(5). <https://doi.org/10.1029/2005WR004383>
- Rossman, L. A. (2000). Epanet 2 User 's Manual. *National Risk Management Research*

- Laboratory Office of Research and Development. U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati, September. <https://doi.org/10.1177/0306312708089715>
- Schal, S. (2013). Water quality sensor placement guidance for small water distribution systems. *Theses and Dissertations--Civil Engineering*. https://uknowledge.uky.edu/ce_etds/13
- Shin, S., Lee, S., Judi, D. R., Parvania, M., Goharian, E., McPherson, T., & Burian, S. J. (2018). A systematic review of quantitative resilience measures for water infrastructure systems. In *Water (Switzerland)* (Vol. 10, Issue 2, p. 164). <https://doi.org/10.3390/w10020164>
- Tanyimboh, T. T., & Templeman, A. B. (1993). Calculating maximum entropy flows in networks. *Journal of the Operational Research Society*, 44(4), 383–396. <https://doi.org/10.1057/jors.1993.68>
- Todini, E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, 2(2), 115–122. [https://doi.org/10.1016/s1462-0758\(00\)00049-2](https://doi.org/10.1016/s1462-0758(00)00049-2)
- Trifunović, N. (2012). *Pattern recognition for reliability assessment of water distribution networks: dissertation submitted in fulfilment of the requirements of the Board for Doctorates of Delft University of Technology and of the Academic Board of the UNESCO-IHE Institute fo*. CRC Press.
- Walski, T. M., Brill, E. D., Gessler, J., Goulter, I. C., Jeppson, R. M., Lansey, K., Lee, H., Liebman, J. C., Mays, L., Morgan, D. R., & Ormsbee, L. (1987). Battle of the Network Models: Epilogue. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 113(2), 191–203. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1987\)113:2\(191\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1987)113:2(191))
- Watson, T. G., Christian, C. D., Mason, A. J., Smith, M. H., & Meyer, R. (2004). Bayesian-based pipe failure model. *Journal of Hydroinformatics*, 6(4), 259–264. <https://doi.org/10.2166/hydro.2004.0019>
- Wright, R., Herrera, M., Pappas, P., & Stoianov, I. (2015). Hydraulic resilience index for the critical link analysis of multi-feed water distribution networks. *Procedia Engineering*, 119(1), 1249–1258. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.987>
- Wolf-Cordera-Ranch benchmark example, <https://emps.exeter.ac.uk/engineering/research/cws/resources/benchmarks/expansion/wolf-cordera-ranch.php>, last accessed on the 19 May 2020.
- Yazdani, A., Otoo, R. A., & Jeffrey, P. (2011). Resilience enhancing expansion strategies for water distribution systems: A network theory approach. *Environmental Modelling and Software*, 26(12), 1574–1582. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.07.016>
- Zhuang, B., Lansey, K., & Kang, D. (2013). Resilience/availability analysis of municipal water distribution system incorporating adaptive pump operation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(5), 527–537. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000676](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000676)