



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

DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA GENERAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DE
ELEMENTOS CRÍTICOS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

GERMÁN ARIEL ANDRÉS FERNÁNDEZ FUENZALIDA

PROFESORA GUÍA:
YOLANDA ALBERTO HERNÁNDEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
YARKO NIÑO CAMPOS
SERGIO BARBERA PÉREZ

SANTIAGO DE CHILE
2021

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

Por: Ariel Andrés Fernández Fuenzalida

Fecha: 26 de mayo de 2021

Profesora guía: Yolanda Alberto

La literatura actual del modelamiento de riesgo en redes de servicios fundamentales presenta algunos métodos de caracterización que permiten establecer los niveles de funcionalidad y de resiliencia de una red de distribución de agua potable, en términos de demanda del servicio, frente a diferentes amenazas naturales. Este panorama hace posible determinar una metodología de caracterización de elementos dentro de una red de agua potable para evaluar el riesgo de falla de cada uno, sujeto a amenazas múltiples, permitiendo optimizar planes de mantenimiento, ampliación y reparación de redes. La metodología consiste en determinar los elementos más críticos en la preservación de la funcionalidad de la red, considerando las métricas fundamentales de desempeño y satisfacción de usuarios del servicio. El producto permite priorizar los elementos de la red según criticidad, detectando aquellas tuberías y nodos predictores de desempeño, estableciendo patrones convenientes de reparación frente a escenarios de daño asociados a amenazas conocidas o estimables. Se establece que las métricas hidráulicas son fundamentales en la estimación de la satisfacción y presentan directa correlación con los modelos numéricos de desempeño involucrados en la evaluación de la metodología. Finalmente, se concluye que el método de evaluación de criticidad basado en diferentes métricas hidráulicas puede responder de forma más específica a las diferentes necesidades existentes entre redes con características particulares de conectividad, recursos o monitorización que los métodos reactivos y aleatorios de priorización en la reparación de redes tras daños asociados a amenazas naturales.

Palabras Claves: redes de distribución, agua potable, riesgo, elementos críticos, análisis Bayesiano, disponibilidad de suministro, análisis basado en presiones.

Para Emilio, mi bello gato dorado.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo me ha demostrado que siempre hay mucho por aprender. Que todo puede ser mejor. Que las herramientas y el tiempo son límites que nos empujan a ser más creativos y desarrollar nuevas formas de resolver nuestros problemas. Este aprendizaje ha sido posible gracias a la confianza y el espíritu de mi profesora guía. Su orientación llena de vocación me ha llenado de preguntas que quiero responder, por lo que este documento, que inicialmente era un mero trámite de titulación, se ha convertido en la expresión más sincera de mis ganas de crecer como investigador, de desarrollar mis capacidades ingenieriles y de convertirme en un agente activo de proposición de cambios. Por ello, dedico un especial agradecimiento a Yolanda Alberto, la mejor profesora guía.

También quisiera, afectuosamente, destacar el apoyo que he recibido de mi muy querida amiga Cyntia, que me ha ayudado espiritualmente de forma constante y me ha orientado muchísimas veces a través de los diferentes procesos de titulación. Sin ella, mi trabajo distaría mucho de lo que hoy es.

Además, y de forma especial, agradezco el amor y el aliento de mis amigas Francisca y Carla. Su permanente compañía y sus contenciones me permitieron mantenerme enfocado aun cuando las tareas se volvieron muy complicadas; y aun en tiempos de crisis sanitaria, han encontrado la forma de abrazarme a la distancia. Gracias por estar. Por todo.

Finalmente, agradezco el incondicional apoyo y la comprensión que recibí de mi novio Matías en esta época de trabajo, investigación y encierro. Me ha acompañado y motivado desde que comencé con el largo camino de la Ingeniería y merece un lugar especial en esta memoria.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL	i
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general	2
1.2. Objetivos específicos	2
1.3. Contenidos del informe	2
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Redes de distribución de agua potable	4
2.1.1. Definiciones fundamentales	4
2.1.2. Elementos de una red de distribución de agua potable	5
2.2. Caracterización de redes de distribución de agua potable	6
2.2.1. Métricas topológicas de caracterización de elementos	8
2.2.2. Métricas hidráulicas de caracterización de redes	9
2.2.3. Resiliencia en redes de distribución de agua potable	12
2.3. Simulación hidráulica de una red de agua potable	13
2.3.1. Modelo hidráulico	13
2.3.2. Consideraciones de modelamiento	16
2.4. Consideraciones prácticas de modelamiento: <i>WNTR</i>	17
2.4.1. Lenguaje de programación	17
2.4.2. Paquetes informáticos	17
2.4.3. Elementos discretos y caracterización	18
2.5. Riesgo de daño en redes de distribución de agua potable	19
2.5.1. Principales modelos de amenaza	19
2.5.2. Riesgo multiamenaza	20

2.6.	Métodos estadísticos	21
2.6.1.	Muestreo aleatorio de Montecarlo	21
2.6.2.	Análisis de probabilidades totales	22
2.7.	VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN DE FALLAS A PARTIR DE IMPACTOS	23
2.7.1.	Índice de suministro – producción	23
2.7.2.	Índice de presión	24
3.	ORGANIZACIÓN Y DISEÑO DE PROCESOS METODOLÓGICOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ELEMENTOS CRÍTICOS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE	25
3.1.	Flujo de trabajo para la identificación de elementos críticos	25
3.1.1.	Ránking de centralidad	25
3.1.2.	Modelo hidráulico	25
3.1.3.	Flujos y presiones basales	25
3.1.4.	Métricas hidráulicas basales	26
3.1.5.	Escenarios de falla	26
3.1.6.	Cálculo de impacto	26
3.1.7.	Análisis probabilístico por elemento	26
3.1.8.	Influencia de impactos sobre métricas hidráulicas	27
4.	APLICACIÓN SOBRE REDES EXPERIMENTALES	29
4.1.	Red experimental	29
4.1.1.	Topología	29
4.1.2.	Patrón de demanda	30
4.1.3.	Caracterización de amenazas	30
4.1.4.	Caracterización de fragilidad	31
4.1.5.	Metamodelo para amenazas múltiples	34
4.2.	Simulación hidráulica	34
4.2.1.	Métricas hidráulicas	35
5.	RESULTADOS DE APLICACIÓN	51
5.1.	Ránking de predictibilidad de falla por elemento	51
5.2.	Ránking de predictibilidad de no falla por elemento	51

5.3.	Métricas hidráulicas y reparación	52
5.4.	Resiliencia y herramientas de orden de criticidad	52
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57
6.1.	Rankings de predictibilidad	57
6.2.	Métricas de caracterización de redes	58
6.2.1.	Aspectos prácticos y metodológicos	58
6.2.2.	Elementos críticos como predictores de robustez	59
6.2.3.	Elementos críticos como predictores de resiliencia	59
6.3.	Análisis multiamenaza: limitaciones y cualidades del uso de metamodelos	60
6.4.	Distribuciones probabilísticas: limitaciones y posibles aplicaciones	60
7.	CONCLUSIONES	62
	BIBLIOGRAFÍA	64

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Red de pruebas para el Índice de Todini	11
2.2	Costo de red de pruebas según su Índice de Todini	11
2.3	Etapas de la recuperación de un sistema	14
3.1	Diagrama de procesos metodológicos. Elaboración propia.	28
4.1	Red de prueba	29
4.2	Centralidad de cercanía de los nodos de la red de prueba	30
4.3	Centralidad de interposición de los nodos de la red de prueba	31
4.4	Grado de los nodos de la red de prueba	32
4.5	Puentes de la red de prueba	32
4.6	Puntos de articulación de la red de prueba	33
4.7	Patrón arbitrario de demanda	33
4.8	Curvas de fragilidad para grados de daño moderado y mayor	34
4.9	Comportamiento basal del porcentaje de nodos cuya presión supera el umbral mínimo de servicialidad	35
4.10	Comportamiento basal del porcentaje de la disponibilidad del servicio de agua potable	36
4.11	Comportamiento basal del Índice de Todini	36
4.12	Comportamiento basal de la entropía del sistema de distribución	37
4.13	Comportamiento basal del porcentaje de nodos cuya presión supera el umbral requerido de desempeño	37
4.14	CDF: variación de la satisfacción porcentual de nodos con la presión mínima funcional	38
4.15	CDF: variación de la disponibilidad del servicio de agua	39

4.16	CDF: variación del Índice de Todini	39
4.17	CDF: variación de la entropía	40
4.18	CDF: variación del porcentaje de nodos satisfechos con la presión requerida	40
4.19	Predictibilidad de falla a partir de la disminución del porcentaje de nodos satisfechos con presión mínima	41
4.20	Predictibilidad de falla y ajuste estadístico a partir de la disminución de la disponibilidad del servicio de agua potable	42
4.21	Predictibilidad de falla a partir de la disminución del índice de Todini	43
4.22	Predictibilidad de falla a partir de la variación de entropía	44
4.23	Predictibilidad de falla a partir de la disminución del porcentaje de nodos satisfechos con presión requerida	45
4.24	Variaciones de porcentaje de nodos satisfechos con la presión mínima funcional a partir de la métrica basal	46
4.25	Variaciones en la disponibilidad del servicio de agua potable en relación a la métrica basal	47
4.26	Variaciones en el índice de Todini en relación a la métrica basal	48
4.27	Variaciones de entropía en relación a la métrica basal	49
4.28	Variaciones de porcentaje de nodos satisfechos con la presión requerida a partir de la métrica basal	50
5.1	Probabilidad de falla de la red dado que el i-ésimo elemento falla	51
5.2	Probabilidad de no falla de la red dado que el i-ésimo elemento no falla	52
5.3	Comportamiento del porcentaje de nodos satisfechos con la presión mínima a través del proceso de reparación según diferentes métodos de priorización	53
5.4	Comportamiento de la disponibilidad de servicio de agua potable (WSA) a través del proceso de reparación según diferentes métodos de priorización	53

5.5	Comportamiento del índice de Todini a través del proceso de reparación según diferentes métodos de priorización	54
5.6	Comportamiento de la entropía a través del proceso de reparación según diferentes métodos de priorización	54
5.7	Comportamiento del porcentaje de nodos satisfechos con la presión requerida a través del proceso de reparación según diferentes métodos de priorización	55
5.8	Resiliencia calculada para cada uno de los métodos de priorización de reparación de tuberías	56

ÍNDICE DE TABLAS

4.1	Parámetros de la red de pruebas	29
4.2	Constantes para las curvas de fragilidad empleadas en el modelamiento	31
4.3	Parámetros de la función de probabilidad distribuida que modela el comportamiento de las variables hidráulicas	38

1. INTRODUCCIÓN

Las obras civiles, desde las estructuras hasta los sistemas de telecomunicación en red, se caracterizan por sus diseños ingenieriles, que han sido desarrollados con la finalidad de asegurar un cierto grado de servicialidad frente a los constantes cambios naturales que se presentan como forzantes externas. Las forzantes naturales incluyen diferentes tipos de eventos, abarcando desde sismos hasta remociones en masa, y se manifiestan en diferentes magnitudes y abarcando múltiples escalas temporales.

El desarrollo de la tecnología de instrumentación ha permitido a los métodos más modernos de diseño involucrar nuevos modelos de amenazas naturales, para determinar comportamientos más certeros que son empleados en las etapas de identificación de amenazas, análisis de vulnerabilidad y mitigación de riesgos que aplican sobre cualquiera de las obras civiles.

En particular, las estructuras críticas que abastecen a la sociedad de recursos fundamentales requieren sostener desempeños altos frente a las amenazas, para evitar la pérdida de funcionalidad en los organismos que permiten la recuperación frente a un evento dañino y mitigar las mermas en la calidad de vida de la sociedad. El desempeño es analizado ampliamente en la literatura disponible, y existen variadas métricas hidráulicas destinadas a la representación del desempeño instantáneo de una red de distribución de agua potable.

El presente trabajo se centra en determinar un método de identificación de los elementos más críticos de una red de distribución de agua potable, considerando tres factores predominantes: la incidencia de la falla de los elementos sobre la disminución de desempeño de la red, en términos hidráulicos y probabilísticos, así como la predictibilidad que posee el correcto funcionamiento de un elemento sobre la preservación del desempeño de la red evaluada.

Se espera que el desarrollo del método de identificación de este documento permita estudiar el comportamiento de las diferentes métricas hidráulicas como descriptores de desempeño en los diferentes escenarios de falla y posterior reparación, determinando cuál es la más útil en el contexto de la maximización de la resiliencia de la red. En consecuencia, será posible emplear dicha

selección para estudiar el valor del método de identificación de elementos críticos, cuyas potenciales aplicaciones engloban las diferentes etapas de planificación de las redes de distribución de agua potable: expansión, mantención y reparación.

1.1. Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo es diseñar un método de evaluación de criticidad de elementos pertenecientes a una red de distribución de agua potable, descrita en términos topológicos e hidráulicos y caracterizada a través del riesgo que percibe a partir de múltiples amenazas naturales.

1.2. Objetivos específicos

- (i) Identificar las métricas representativas del estado de desempeño de una red de distribución de agua potable, caracterizada en forma topológica e hidráulica.
- (ii) Estimar la confiabilidad de predicción de falla de la red que poseen las diferentes métricas hidráulicas.
- (iii) Establecer un método probabilístico general de evaluación de criticidad de elementos de una red de distribución de agua potable.
- (iv) Evaluar las variaciones de resiliencia que se producen en una red de pruebas a partir de la aplicación del método de evaluación de criticidad y posterior reparación de acuerdo a los resultados obtenidos.

1.3. Contenidos del informe

El presente trabajo de memoria de título de compone de 8 capítulos:

- (i) Introducción: se describen los fenómenos involucrados en los modelos de confiabilidad de las redes de distribución de agua potable. El capítulo abarca los enfoques actuales de priorización de mantención, reparación y reemplazo de elementos de redes de agua

potable; así como la motivación de establecer una metodología general para orientar los procesos descritos en escenarios de daño provocado por amenazas naturales.

- (ii) Revisión bibliográfica: se abordan las materias necesarias para la comprensión de las variables involucradas en los modelos de riesgo en redes de agua potable debido a la presencia de amenazas naturales, en los análisis estadísticos predictivos y descriptivos empleados en el análisis de los resultados y las metodologías existentes de evaluación de desempeño de una red de agua potable.
- (iii) Organización y diseño de procesos metodológicos para la identificación de elementos críticos en redes de distribución de agua potable: se indican los módulos metodológicos necesarios para modelar la información con que se cuenta en términos de amenazas, fragilidad y desempeño; presentando los procesos específicos de cálculo y modelamiento en cada etapa, así como la individualización de los resultados esperados y los análisis factibles en el flujo de información.
- (iv) Aplicación sobre redes experimentales: se aplica la metodología, diseñada en el capítulo anterior, sobre una red experimental, abarcando elementos prácticos de modelamiento y presentación de resultados.
- (v) Resultados de aplicación: se presentan los resultados fundamentales para las conclusiones finales del presente trabajo.
- (vi) Análisis de resultados y discusión: se realiza una descripción intensiva de los resultados obtenidos en el capítulo anterior, aplicando lineamientos de interpretación de resultados y de las estadísticas predictivas y descriptivas que se pueden generar a partir de ellos.
- (vii) Conclusiones: se presentan las conclusiones del trabajo realizado, abarcando los lineamientos para la selección de las variables principalmente influyentes en los resultados y determinando trabajos futuros que potencialmente pueden complementar el desarrollo integral de la metodología propuesta.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En el presente capítulo se establecen los conocimientos fundamentales para la comprensión de los métodos involucrados en el modelamiento de amenazas naturales y los riesgos que estas representan para las redes de distribución de agua potable, la descripción y el comportamiento de las redes de distribución de agua potable a partir de elementos topológicos como hidráulicos, los ejes principales de la definición de la resiliencia en redes de distribución de agua potable y ciertas metodologías estadísticas para la caracterización descriptiva de variables aleatorias y la justificación de la aseveración de ciertas correlaciones probabilísticas.

2.1. Redes de distribución de agua potable

2.1.1. Definiciones fundamentales

La Unión Europea se refiere, durante el año 2008, a la infraestructura crítica, abordando definiciones, conceptos y ciertas aplicaciones asociadas a la preservación de los servicios esenciales. Los servicios esenciales corresponden a aquellos necesarios para sostener las funciones sociales básicas, incluyendo las áreas de la salud, la seguridad, el bienestar social y económico de los ciudadanos, así como el funcionamiento eficaz de las Instituciones del Estado y las Administraciones Públicas (Consejo Europeo, 2008).

La descripción establecida por el Consejo Europeo ha sido la base del desarrollo del concepto de infraestructura crítica en latinoamérica, empleándose como marco normativo y como fuente directa en múltiples artículos de investigación en el área (Montes, 2017; Horzella, 2019).

En particular, debido a los estados de daño experimentados debido a amenazas naturales en diversos países de latinoamérica, se poseen amplios registros de posibles escenarios catastróficos, y se considera que las vulnerabilidades presentes en la infraestructura crítica de los diferentes servicios esenciales son el factor sobre el cual la sociedad tiene más posibilidades de influencia. También

se observa que el actual enfoque de desarrollo de confiabilidad se centra en el aumento de la resiliencia de los sistemas involucrados en la captación y distribución de agua potable en lugar de la reparación de daños de forma posterior a los escenarios de falla (Paltán et al., 2020).

El sistema de distribución es un conjunto de elementos interconectados que permite transportar el agua potable desde las plantas de potabilización hacia los usuarios en condiciones controladas de presión y caudal. Estas características definen la funcionalidad que presenta el servicio para el usuario final, y se consideran como la base de las métricas de desempeño de una red de distribución de agua potable. Es importante distinguir el usuario como cliente del usuario como habitante. Se define como cliente al ente que posee propiedad sobre un arranque de agua potable –o salida de la red– y por lo tanto se considera como un punto fijo de salida con ciertos patrones de consumo; mientras que los habitantes son las personas que viven en el territorio asociado a una red de distribución de agua potable, siendo la generalidad, encontrar diferentes cantidades de habitantes por cliente que se distribuyen de forma heterogénea en el área y en los clientes. Algunos estudios indican la existencia de correlación negativa entre el ingreso per cápita de los habitantes y la densidad de habitantes por cliente dentro de una red de distribución de agua potable (Durán, 2015).

2.1.2. Elementos de una red de distribución de agua potable

Una red de distribución de agua potable es el medio que conecta el ingreso en diferentes tipos de fuente de agua potable, como plantas de potabilización, estanques, reservorios o cisternas, con los arranques de agua potable. Los elementos que conforman este medio son los siguientes:

- Tuberías: conjunto de elementos, generalmente cilíndricos, cuyos extremos se encuentran abiertos y permiten su conexión a otros elementos.
- Estanques: elementos de volumen masivo con capacidad de reservar agua para redistribuirla posteriormente. Esta estructura permite captar caudales bajos en horarios de baja demanda para generar caudales altos en horarios de alta demanda, o bien, aumentar la presión de flujos de agua que han sido sometidos a pérdidas considerables.

- Válvulas: elementos de control de flujo, capaces de permitir o impedir el paso de agua en cierto punto de la red. Esta función es fundamental para la sectorización en situaciones de reparación, extensión y mantención de tuberías; así como gestionar distribuciones parcializadas en situaciones de baja captación.
- Conexiones: elementos que unen otros elementos mencionados anteriormente. Poseen dimensiones y formas especiales adaptadas a los elementos conectados, predominando altamente las conexiones entre tubos.

2.2. Caracterización de redes de distribución de agua potable

Las redes de distribución de agua potable poseen una enorme variabilidad, debido a las múltiples dimensiones de demanda que deben satisfacer. Entre ellas, las condiciones de uso de suelo locales –que es una variable espacial y temporal–, de patrones de demanda únicos de cada población, de disponibilidad de agua, de disponibilidad de recursos, entre otras. Por esto, es necesario contar con métodos de caracterización sistemática de las redes, de forma independiente de estos requerimientos, pero lo suficientemente representativas como para poseer un significado interpretable y a la vez sugerente de características valorables de forma práctica en la red de distribución de agua potable.

La revisión bibliográfica llevada a cabo para el presente proyecto captura múltiples métodos de caracterización de redes, que abarcan tres aspectos fundamentales: el estadístico, el espectral y el hidráulico.

La caracterización estadística se basa por completo en la configuración topológica y geométrica de la red para caracterizar el sistema como un conjunto, o sus elementos. La caracterización espectral se basa en el análisis de la matriz de adyacencia que abstrae los elementos de la red de distribución de agua potable, por lo que los factores geométricos no influyen directamente en esta observación. Finalmente, los métodos de evaluación hidráulica reflejan el comportamiento de los flujos, de las presiones y los patrones de demanda de la red de distribución de agua potable para establecer grados de desempeño en términos de la satisfacción de caudales como de presiones en

los arranques de agua potable. A continuación, se presenta una caracterización detallada sintética de los tipos de métricas que se encuentran en la literatura:

- Métricas sistémicas: corresponden a métricas que capturan el funcionamiento, en un único índice, para una determinada red, en un instante de tiempo.
 - Métricas sistémicas estadísticas: son índices que representan la estructura del sistema y cuyo valor depende exclusivamente de la conformación geométrica y topológica de la red. Debido a ello, pueden ser calculadas sin modelar el sistema de forma hidráulica.
 - Métricas sistémicas espectrales: son índices que representan la estructura del sistema y cuyo valor depende exclusivamente de la matriz de adyacencia asociada al grafo de abstracción de la red de distribución de agua potable. En particular, son calculables a partir de los eigenvalores y eigenvectores de dicha matriz.
 - Métricas sistémicas hidráulicas: son índices que representan el comportamiento hidráulico del sistema y cuyo cálculo requiere conocer las variables hidráulicas en cada instante, por lo que es requerido modelar la red hidráulicamente para determinar su valor.
- Métricas elementales: son índices que caracterizan cada uno de los elementos de una determinada red de forma individual. Estas métricas pueden presentar variaciones espaciales como temporales.
 - Métricas elementales estadísticas: son índices elementales cuyo valor depende exclusivamente de la conformación geométrica y topológica de la red así como de la posición relativa que ocupa el elemento en esta red. Debido a la naturaleza de estas métricas, pueden ser calculadas sin modelar el sistema de forma hidráulica.
 - Métricas elementales hidráulicas: son índices que reflejan el comportamiento hidráulico de cada elemento de la red, considerando variables hidráulicas como la presión, las pérdidas de energía o los caudales para ello.

Cabe destacar que no se encuentran metodologías de cálculo de métricas espectrales para la caracterización de elementos de la red. Esto, debido a que la matriz de adyacencia se separa de las características individuales de los elementos para representar la conectividad que existe entre ellos.

2.2.1. Métricas topológicas de caracterización de elementos

Algunas métricas topológicas permiten estimar el nivel de centralidad de los elementos que conforman una red de distribución de agua potable. Para el presente trabajo, estas métricas representan una forma sencilla y directa de establecer la prioridad que tienen los elementos de una determinada red en términos de centralidad topológica. A continuación, se indican las métricas topológicas elementales a emplear para caracterizar la centralidad que posee cada elemento de la red:

- (i) Grado nodal (Yazdani et al., 2011)

El grado de un nodo corresponde a la cantidad de tuberías que convergen en él.

- (ii) Puntos de articulación (Yazdani et al., 2011)

Un punto de articulación es una conexión cuya eliminación resulta en el aumento de la cantidad de elementos desconectados. Esta variable se asocia a la robustez de la red.

- (iii) Centralidad de interposición (Rokneddin et al., 2013; Freeman, 1977)

Centralidad de un elemento de la red, considerando la cantidad de pares origen–destino ($O - D$) que contienen un cierto nodo o vector al seleccionar los caminos geodésicos entre cada par posible.

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

donde s y t son todos los pares de origen y destino de la red y n_{st}^i es la función indicador que toma el valor 1 si el nodo i es empleado en el camino geodésico st y el valor 0 en caso contrario.

- (iv) Centralidad de cercanía (Klise et al., 2017)

Inverso de la suma de la longitud de camino más corta desde un nodo a cada uno de los demás nodos.

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

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

(v) Puentes (Klise et al., 2017)

Una tubería es considerado un puente si su eliminación resulta en el aumento de elementos desconectados de una red. En particular, la cantidad de puentes aumenta en la medida que la redundancia disminuye.

2.2.2. Métricas hidráulicas de caracterización de redes

Las métricas hidráulicas permiten caracterizar el funcionamiento de la red de distribución de agua potable a partir del modelo hidráulico. Las métricas hidráulicas sistémicas se asocian al desempeño de la red, mientras que las métricas hidráulicas elementales caracterizan el funcionamiento de cada elemento de la red.

Las métricas hidráulicas estudiadas a partir de la presente revisión se especifican a continuación, con indicaciones breves de referenciación y sobre las características intrínsecas de la red que estas reflejan.

(i) Presión

La presión es una variable hidráulica útil en el análisis de satisfacción de estándares de desempeño, así como necesaria para el modelamiento de caudales en la red. En particular, la fracción de nodos cuya presión de salida se encuentra sobre el mínimo requerido representa la funcionalidad de la red, mientras que la fracción de nodos cuya presión de salida se encuentra cerca de la presión requerida representa el desempeño de la red.

(ii) Demanda (Ostfeld et al., 2002)

La demanda se estima a partir de las conductas de consumo de los usuarios y las condiciones hidráulicas de la red. Es importante distinguir la demanda de la demanda esperada,

ya que la primera depende del estado de la red y calcula el caudal que obtiene el cliente al seguir su comportamiento regular bajo las condiciones de presión modeladas, mientras que la segunda es independiente del estado de la red y se estima directamente a partir de los patrones de demanda del cliente.

(iii) Disponibilidad del servicio de agua (Ostfeld et al., 2002)

Es la razón entre la demanda y la demanda esperada. En términos abstractos, corresponde al flujo que sale de la red en un determinado escenario comparado con el flujo que se esperaría que salga de la red en condiciones regulares de funcionamiento. Al ser una métrica relativa al estado normal de la red, se asegura que la funcionalidad de cada red particular se analiza sin sobreestimar la capacidad basal, como es el caso de la fracción de nodos satisfechos.

(iv) Índice de Todini (Todini, 2000)

El índice de Todini se relaciona con la capacidad que posee un sistema de distribución para sobrellevar fallas, sosteniendo los caudales de salida y la presión en los nodos. El índice define la resiliencia a través del tiempo como una medida del ingreso de energía hacia cada nodo y se basa en el concepto de redundancia relativa de energía. El cálculo del índice responde a la ecuación 2.3.

$$I = 1 - \frac{P_{int}^*}{P_{max}^*} \quad (2.3)$$

con P_{int}^* la cantidad de energía disipada en la red de distribución de agua potable, y P_{max}^* la máxima energía que sería disipada internamente para satisfacer la demanda de presión y caudal en cada uno de los nodos al variar los diámetros de las tuberías del sistema.

El ejemplo presentado por Todini (2000) muestra una red de prueba (Figura 2.1) que recibe una variación de parámetros (Figura 2.2), mostrando que una mayor resiliencia, reflejada por esta métrica, requiere una mayor inversión en términos de costo de tuberías.

(v) Entropía (Awumah et al., 1990)

La entropía es una medición de la incertidumbre en una variable aleatoria. En el modelo de una red de distribución de agua, la variable aleatoria es el flujo que transportan las

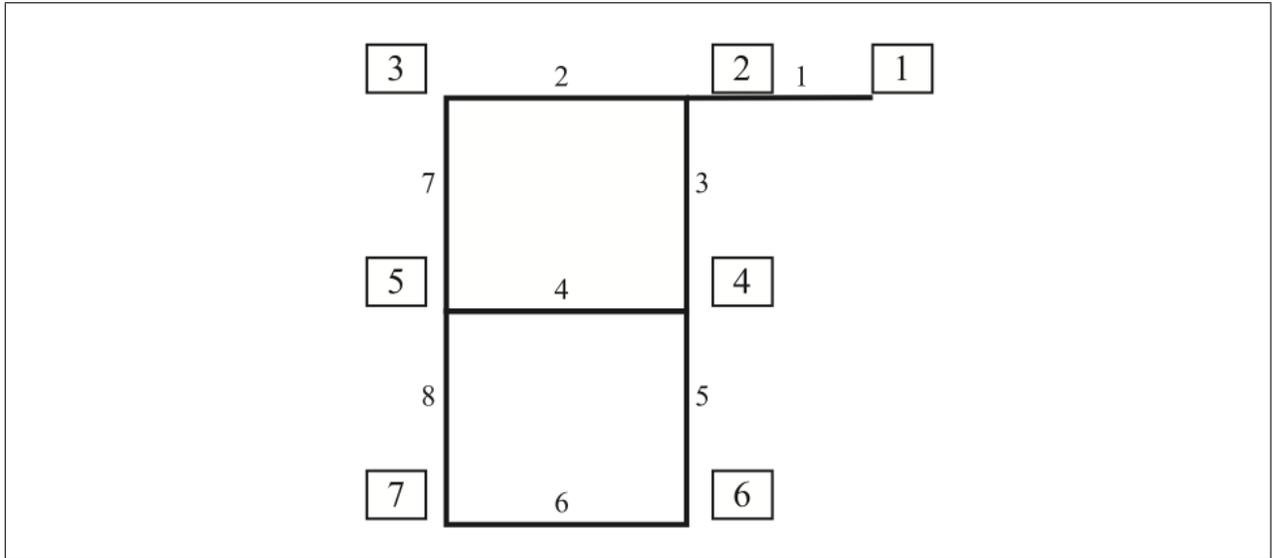


Figura 2.1. Red de pruebas para el Índice de Todini (Todini, 2000).

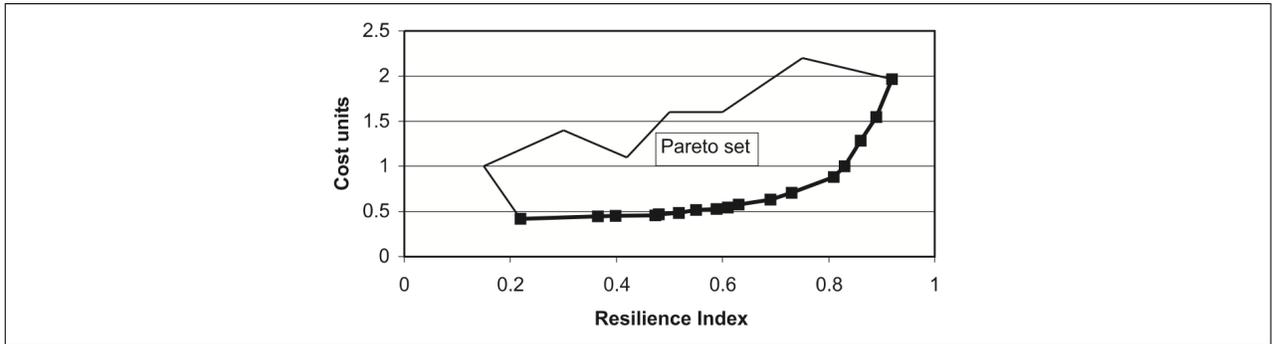


Figura 2.2. Costo de red de pruebas según su Índice de Todini (Todini, 2000).

tuberías, y la entropía representa los caminos alternos que puede emplear el flujo para evitar una determinada tubería. Una red que funciona en condiciones de máxima entropía es considerada redundante, con múltiples caminos alternativos de flujo para satisfacer la demanda. La conectividad cambia en cada instante de tiempo, debido a que los caminos siguen la dirección del flujo, a diferencia de las métricas topológicas.

La métrica se obtiene a partir de las ecuaciones 2.4 y 2.5.

$$S_j = -\sum_{i \in U_j} \frac{q_{ij}}{Q_j} \ln \frac{q_{ij}}{Q_j} \quad (2.4)$$

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

del nodo j .

$$\hat{S} = \sum_{j=1}^N \left[\frac{Q_j}{Q_0} S_i \right] - \sum_{j=1}^N \left[\frac{Q_j}{Q_0} \ln \frac{Q_j}{Q_0} \right] \quad (2.5)$$

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

- (vi) Fracción porcentual de nodos satisfechos en términos de presión: corresponde a la fracción de nodos que perciben una presión mayor a cierto umbral en relación a la cantidad de nodos que percibirían una presión mayor al mismo umbral en condiciones normales. Esta métrica posee la misma ventaja que la Disponibilidad de Agua Potable.

Las métricas hidráulicas basadas en los márgenes de tolerancia del servicio –presión y disponibilidad del servicio de agua potable – son indicadores de desempeño porque sus definiciones cuantifican la cantidad de nodos satisfechos en términos de demanda de presión y de caudal. La diferencia entre estas dos métricas radica en que la presión es comparada con un valor normativo –presión mínima– mientras que la disponibilidad del servicio de agua potable es dinámico y los caudales entregados a los consumidores son comparados con el caudal que recibirían en condiciones de funcionamiento normal de la red. Esto indica que la disponibilidad del servicio de agua potable es capaz de capturar el comportamiento anormal de la red a partir de su comportamiento basal y no del comportamiento ideal esperado de distribución de presiones.

Algunas de las métricas hidráulicas sistémicas son calculadas a partir de la contribución elemental, por lo que es posible determinar si existe algún grado de relación entre esta contribución hidráulica y la centralidad de los elementos descrita a partir de las métricas topológicas elementales.

2.2.3. Resiliencia en redes de distribución de agua potable

La resiliencia de una red de distribución de agua potable es la característica que cuantifica ciertos rasgos relevantes para sostener el grado de desempeño de la red frente a amenazas que se manifiestan de forma heterogénea en el espacio y en el tiempo. Los factores fundamentales que influyen en la caracterización se describen a continuación y se esquematizan en la Figura 2.3. Además, el método de cálculo de resiliencia empleado en el presente trabajo se indica en la ecuación

2.6.

$$RS = \frac{\int_{t_0}^{t_0+T} Q(t)dt}{T} \quad (2.6)$$

donde RS es la resiliencia de un proceso de restauración de la red de distribución de agua potable, t_0 es el tiempo en que se produce la disminución de desempeño, T es el período que transcurre desde t_0 hasta alcanzar nuevamente el funcionamiento basal y $Q(t)$ es una métrica de caracterización hidráulica de la red.

- (i) Robustez: corresponde a la capacidad de la red de absorber daño proveniente de la expresión de una amenaza natural sin disminuir significativamente el desempeño, i.e. entre dos redes que reciben la misma cantidad de daño, aquella que disminuya en menor grado su desempeño es la más robusta.
- (ii) Rapidez: corresponde a la capacidad del operador de recuperar el desempeño de forma rápida, i.e. entre dos redes que perciben una disminución de desempeño, aquella cuyo desempeño aumenta más rápidamente es la más rápida.
- (iii) Redundancia: corresponde a una característica que aumenta cuando la red puede surtir una demanda puntual a través de múltiples caminos hidráulicos simples diferentes entre sí, asegurando que frente a la falla de uno de los caminos simples, existen caminos simples alternativos para satisfacer la demanda sin interrupciones.
- (iv) Ingenio: algunos autores proponen la existencia de este cuarto factor, que representa la eficiencia en la identificación de problemas y fallas, priorizando de forma eficiente las soluciones óptimas y asignando recursos de forma correcta.

2.3. Simulación hidráulica de una red de agua potable

2.3.1. Modelo hidráulico

Para modelar la red de distribución de agua potable se requiere una descripción abstracta que considere los elementos de la red de distribución de agua potable en términos de localización y

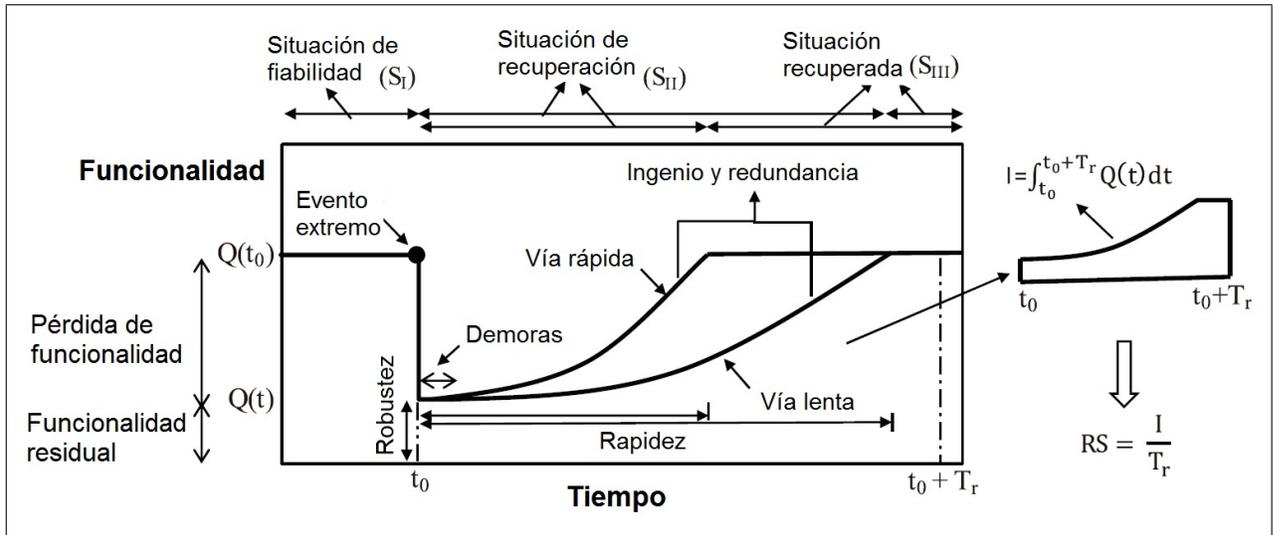


Figura 2.3. Etapas de la recuperación de un sistema (Anwar et al., 2020).

estado, así como las propiedades elementales que influyen en el comportamiento del flujo de agua y las disminuciones de presión.

A continuación, se especifica la forma en que el modelo hidráulico refleja los elementos de la red de distribución de agua potable, considerando la representación de elementos y de sus propiedades.

2.3.1.1. Elementos abstractos

Una red compuesta por nodos y vectores puede ser abstraída como un grafo matemático $G = G(V, E)$, donde V corresponde al conjunto de nodos que conforman la red, mientras que E es el conjunto de vectores que unen dos nodos del conjunto V . En la práctica, se asocia un vértice a cada conexión del sistema, así como a cada entrada y salida de flujo. Las propiedades geométricas que posee cada vértice son, por tanto, dos coordenadas planimétricas y una altimétrica. Por otro lado, considerando que un vértice puede estar asociado a un cliente, a un estanque o a una planta de tratamiento, se ha de asignar un caudal –de entrada o de salida– que represente este flujo. En modelos simples se puede buscar una condición estacionaria en que este flujo sea constante. En modelos más complejos, estos caudales pueden ser modelados a través de funciones de consumo que, dentro del área de la distribución de agua potable, son conocidos como patrones temporales

de consumo del cliente, o bien, patrones de oferta, dependiendo de si son caudales de consumo o de ingreso de agua al sistema, respectivamente. En el caso de ingreso de agua, se controla la presión de ingreso en lugar del caudal, por lo que los patrones de oferta representan la presión impuesta en el punto de ingreso a través del tiempo. En términos sencillos, un ingreso de agua se modela como una presión impuesta sobre el nodo de entrada –no necesariamente constante– y los consumos se representan como una salida de caudal cuyo comportamiento es descrito por los patrones de consumo.

2.3.1.2. Predicción de comportamiento

El comportamiento del flujo es regido por las leyes físicas de la hidráulica en contornos cerrados. Esto es, los flujos dependen de la presión que actúa sobre el fluido y responden a la conservación de masa en cualquier punto de la red, mientras que la presión varía, de forma espacial debido a las pérdidas de presión –debido a la rugosidad interior de las tuberías o a las pérdidas singulares de válvulas o conexiones–, y de forma temporal debido a los cambios en la demanda y al comportamiento dinámico del flujo.

Lo anterior permite concluir que, aunque se considere un modelo simple, el proceso de cálculo puede resultar extenso debido a la recursividad del problema. Sin embargo, existen modelos de diferentes niveles de fidelidad y complejidad, siendo los cuasi-estáticos estacionarios los más simples y los dinámicos recursivos los más elaborados.

El comportamiento considerado en el presente trabajo corresponde al propuesto por la *Environmental Protection Agency* de EE.UU (EPA), debido a la disponibilidad de sus recursos, así como la alta compatibilidad que presenta, debido a que las consideraciones son implementadas a través de lenguajes de código abierto y a que emplean la extensión *.inp* como formato de archivo de entrada como de salida, abriendo la posibilidad de exportar hacia, e importar desde múltiples aplicaciones computacionales, como *EPANET* o *WaterCAD*, los resultados obtenidos, siendo posible extender el alcance del presente estudio a través de futuros proyectos de investigación.

2.3.2. Consideraciones de modelamiento

La simulación del comportamiento hidráulico se puede realizar empleando dos tipos de modelos, con consideraciones especiales para cada uno de ellos, y se indican a continuación:

- (i) Modelo basado en el análisis de demanda: Este tipo de modelo disminuye el tiempo de cálculo considerando el supuesto de que cada demanda en la red es satisfecha (Cheung et al., 2005). En particular, tras un evento desastroso asociado a amenazas naturales, la demanda posee comportamientos que resultan significativos para caracterizar la resiliencia del sistema de distribución de agua potable, y existen antecedentes de uso de modelos composicionales para estimar este impacto, que depende de las diferencias entre la disponibilidad de agua potable y de la demanda como elemento variable (Didier et al., 2018).
- (ii) Modelo basado en el análisis de demanda de presión: Este tipo de modelo considera que existe una relación entre la presión efectiva en un punto de salida y la demanda efectiva que se produce. Se requiere definir el rango de presiones en el que no se considera que fluya caudal de forma considerable, así como el rango en que la presión es suficiente para que la demanda sea igual a la demanda esperada. Para presiones que no pertenecen a ninguno de estos rangos, se modela una relación entre esta y la demanda efectiva. Ciertos autores aseveran que los resultados mejoran y abarcan una mayor cantidad de escenarios (Cheung et al., 2005; Martínez García et al., 2020). En adición, algunos estudios han empleado este tipo de modelo para verificar que su aplicación es una buena representación de la realidad de las redes de distribución de agua potable más complejas (Wu et al., 2008, 2009).

Debido al impacto que genera un escenario de catástrofe natural, se considera incorrecto asumir que las demandas de caudal son satisfechas de forma regular en estas condiciones, por lo que se emplea el segundo tipo de modelo hidráulico a través de todas las etapas del trabajo.

2.4. Consideraciones prácticas de modelamiento: WNTR

Esta sección abarca aspectos prácticos del modelamiento hidráulico de una red de distribución de agua potable, iniciando con las especificaciones del *software* que se requiere para el funcionamiento de todos los módulos involucrados, los métodos empleados en el ingreso de información, modelamiento, y extracción de resultados.

2.4.1. Lenguaje de programación

Con el fin de sostener la replicabilidad y la disponibilidad de los elementos informáticos necesarios involucrados en la metodología, se prefiere el lenguaje de programación *Python*, considerando como un factor positivo que es un lenguaje de código abierto y su compatibilidad con múltiples sistemas operativos y una amplia gama de *hardware*. La versión empleada en el presente trabajo corresponde a la distribución de *Conda*, y debe ser específicamente el lanzamiento oficial de su iteración 3.7.

2.4.2. Paquetes informáticos

El modelamiento práctico se realiza empleando el paquete para *Python 3.7*¹ *Water Network Tool for Resilience* (WNTR), desarrollado por la EPA y puesto a disposición a través de su página web. Esta herramienta es compatible con el sistema de modelamiento *EPANET*, empleando los mismos métodos de cálculo y pudiendo importar y exportar archivos del formato principal de dicho *software*.

La mayor ventaja del uso del paquete por encima de la interfaz gráfica de *EPANET* corresponde a la capacidad de cambiar elementos de forma programable e iterable, con base en las necesidades de investigación de criticidad de elementos, así como la opción de modelar un sistema basado en demanda como en presión, mientras que *EPANET* atribuye a la red la capacidad de cumplir la demanda como punto inicial del cálculo (Rossman et al., 2000). Este supuesto es bastante aceptable

¹El paquete WNTR es compatible con la versión 3.7 de Python distribuido por Conda.

en condiciones normales de funcionamiento de una red de distribución de agua potable, pero no satisface las necesidades investigativas asociadas a la falla de una red basada en la disminución del desempeño.

Para el correcto funcionamiento del paquete *WNTR*, se requiere interactuar con los paquetes siguientes, de los cuales se indican las capacidades empleadas:

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

2.4.3. Elementos discretos y caracterización

El subpaquete de modelo incluido en el paquete *WNTR* posee herramientas para trabajar con los siguientes tipos de elementos:

- Uniones: punto donde se produce una unión o bifurcación del flujo de agua.
- Estanques: estructuras de reserva artificiales que poseen nivel variable.
- Reservorios: reservas masivas de agua, como lagos y embalses.
- Tuberías: estructuras cilíndricas de materiales diversos que conducen el flujo de agua.
- Bombas: elementos puntuales que inyectan energía al flujo de agua.
- Válvulas: elementos puntuales que realizan una pérdida de energía, pudiendo detener el flujo.
- Patrones: corresponden a descripciones cuantitativas de los comportamientos de la demanda de agua potable.
- Curvas: corresponden a descripciones cuantitativas de la relación entre la presión y el caudal que provoca una bomba del sistema, o bien –cuando se asignan a estanques– a la función que relaciona la altura de la superficie libre y el volumen restante en el estanque.

Esta relación no necesariamente es lineal, pues depende de la sección transversal que posee el estanque en función de la altura.

- Controles: instrucciones programables que imponen niveles de funcionamiento de elementos como válvulas y bombas.
- Fuentes: puntos de la red donde un cierto flujo conocido ingresa a la red.
- Opciones de simulación: tamaño de elementos diferenciales temporales y espaciales del modelamiento; instrucciones sobre los supuestos de demanda o de presión que se imponen al inicio de la simulación, resultados deseados y algunos parámetros de manejo económico.
- Coordenadas de nodos: coordenadas de puntos a los cuales pueden ser asignados otros elementos, como extremos de tuberías, bombas, válvulas, fuentes, etc.

Estos elementos permiten una representación abstracta de todos los elementos encontrados en la red física, incluyendo los no tangibles, como patrones de presión de ingreso de agua y de demanda.

El método de modelamiento WNTR posee herramientas de extracción de métricas de resiliencia que permiten caracterizar de forma cuantitativa la capacidad de la red de recuperarse tras sufrir pérdidas de desempeño. Una vez que se posee el modelo, se pueden extraer inmediatamente las métricas topográficas de la red y, luego de simular el proceso de distribución, se pueden extraer las métricas hidráulicas. Las primeras solo requieren conocer los elementos de la red de distribución, mientras que el segundo conjunto requiere información sobre el comportamiento hidráulico, que solo se conoce luego de simular los flujos.

2.5. Riesgo de daño en redes de distribución de agua potable

2.5.1. Principales modelos de amenaza

Los riesgos asociados a los daños en una red solo pueden ser determinados en forma probabilística, debido a la variabilidad, aleatoriedad e incertidumbre asociadas tanto a las amenazas

naturales como a la capacidad de una red (Jayaram & Srinivasan, 2008). Por ello, se han de modelar las principales amenazas frente a las cuales la red es susceptible. Las amenazas a las cuales una red se ve expuesta comúnmente son los sismos, el viento, las inundaciones, el congelamiento, los flujos detríticos, los cortes de energía, los incendios y la liberación de materiales nocivos al medioambiente (Javanbarg et al., 2009).

Existen modelos de sismicidad que permiten determinar los eventos principales dentro de una zona geográfica (Reasenber, 1985; Gardner & Knopoff, 1974; Knopoff & Gardner, 1972) y, en particular, existen modelamientos previos al interior del territorio chileno (Poulos et al., 2018; Núñez et al., 2014). Los tests de hipótesis indican que la sismicidad se puede modelar correctamente asumiendo una distribución sísmica homogénea en el tiempo (Luen & Stark, 2011). Todo esto brinda la capacidad de calcular un período de retorno para una cierta magnitud de sismo; así como un sismo esperado dentro de un cierto período de tiempo.

Por otro lado, se tienen antecedentes de modelamiento de zonas de inundación en zonas costeras como fluviales basados en análisis de variables hidrológicas a nivel de cuencas como subcuencas, por lo que para una determinada red, es posible establecer zonas de inundación para diferentes períodos de retorno (Cocuñame Ricardo & Salcedo Hurtado, 2017).

2.5.2. Riesgo multiamenaza

Para determinar el estado de daño de una estructura frente a múltiples amenazas, se requiere conocer cada una de las amenazas por separado para determinar la probabilidad de impacto de cada una de ellas. Por otro lado, también se requiere emplear un modelo de interacción de impactos percibidos. A esto se le llama metamodelo, y corresponde al estudio de la probabilidad de falla debido a un determinado impacto, dado que la estructura ha absorbido impactos previos de otra amenaza natural (Kameshwar & Padgett, 2014).

En el presente trabajo, se desea diseñar un método de caracterización de criticidad de elementos de una red de distribución de agua potable frente a múltiples amenazas, por lo cual se emplea un metamodelo de interacción incremental entre dos amenazas sísmicas, así como entre una amenaza

sísmica y la amenaza de inundación. Para ello, se establece un metamodelo arbitrario que puede ser refinado en futuras aplicaciones, considerando información de fragilidad combinada experimental para múltiples amenazas en la red objetivo.

2.6. Métodos estadísticos

En el análisis de grandes cantidades de escenarios posibles para una variable aleatoria, es necesario emplear algunas metodologías de condensación de resultados para atribuir características descriptivas a las variables involucradas en el proceso de modelamiento y su influencia sobre los resultados posibles. Con este fin, se emplea el método de Montecarlo en el análisis de los múltiples escenarios de falla de una red, con las componentes respectivas de incertidumbre de cada amenaza natural y de la fragilidad del sistema, estableciendo el comportamiento estadístico de diferentes métricas y las correlaciones que dichos comportamientos presentan respecto a la falla de la red.

Por otro lado, las correlaciones obtenidas se deben poner a prueba estadísticamente, para lo cual se realizan análisis Bayesianos, cuya principal finalidad es de rechazar –o no– una determinada hipótesis estadística basada en las observaciones realizadas y establecer un nivel de confiabilidad en la aceptación de la hipótesis de correlación.

A continuación, se presenta la teoría implicada en cada uno de los procesos descritos anteriormente.

2.6.1. Muestreo aleatorio de Montecarlo

El muestreo aleatorio de Montecarlo es un método de análisis estadístico descriptivo basado en la generación de escenarios resultantes de un proceso estocástico cuya incertidumbre pueden ser modelada, y que permite establecer relaciones entre las variables determinísticas del modelo y la probabilidad de que sus valores generen determinados resultados.

El presente estudio emplea el método para analizar las relaciones existentes entre las forzantes de una red de agua potable que se modelan de forma estocástica, y el comportamiento que presenta el servicio en términos de resiliencia.

Para una cantidad N de escenarios generados, se define la probabilidad de exceder el estado de excedencia para un determinado umbral de tolerancia como:

$$P(\delta > u) = \frac{n}{N} \quad (2.7)$$

donde δ es la variación observada en el índice de salida y n es la cantidad de escenarios en que se supera el umbral de falla u .

2.6.2. Análisis de probabilidades totales

Un evento probabilístico posee un conjunto de resultados posibles conocidos como el recorrido del experimento. Cuando el resultado de dicho evento puede ser caracterizado a través de una determinada variable, se dice que la variable es aleatoria y se puede emplear en la estimación de la probabilidad de ocurrencia de uno o más de los resultados posibles. Esta estimación tiende a la probabilidad en la medida aumenta la cantidad de resultados del evento probabilístico como consecuencia del teorema del límite central.

La estimación de una probabilidad se realiza según la ecuación ??.

$$\hat{P}(X = x) = \frac{\#U_x}{\#U} \quad (2.8)$$

donde $\hat{P}(X = x)$ es la probabilidad estimada de que la variable aleatoria X adquiera el valor x , $\#U_x$ es la cardinalidad del conjunto de resultados en que X adquiere el valor x , mientras que $\#U$ es la cardinalidad del conjunto de todos los resultados generados a partir del evento probabilístico.

Esta estimación puede ser empleada para cualquier conjunto $\#U_x$, por lo que permite generar aproximaciones de eventos condicionados por un determinado evento cuando se analizan dos conjuntos entre los cuales existe una relación de subconjunto.

2.7. Variables de caracterización de fallas a partir de impactos

2.7.1. Índice de suministro – producción

El suministro de un servicio es un proceso en cadena que involucra múltiples etapas. En un sistema de distribución de agua potable, el eje principal de actividades consiste en la recolección de agua desde el medio, acondicionamiento y potabilización y posterior distribución. Debido a la superposición de procesos, múltiples parámetros pueden estar involucrados en la caracterización del desempeño del suministro.

El desempeño del servicio puede ser relacionado con la cantidad de consumidores que tienen acceso al servicio en un determinado instante, respecto a la cantidad total de consumidores que se espera que el sistema satisfaga. Para esta relación, es necesario establecer condiciones mínimas de satisfacción por parte del distribuidor, como un caudal mínimo aprovechable por el usuario, de manera que los usuarios satisfechos corresponden a aquellos que pueden acceder a un caudal mayor al de umbral mínimo.

A partir de lo anterior, se pueden considerar dos índices de suministro – producción a diferentes escalas:

- Cantidad de nodos cuya demanda es satisfecha en relación a la cantidad de nodos totales.
- Suministro total entregado sobre la demanda total esperada.

Ambos instrumentos corresponden a la disponibilidad del servicio de agua potable: el primero para determinar la fracción de nodos satisfechos y el segundo para determinar la fracción de caudal satisfecha.

Se considera que el primer instrumento es más útil debido a que representa tangiblemente la fracción de arranques satisfechos, mientras que el segundo instrumento puede estar sesgado, considerando que todos los nodos pueden recibir caudales insuficientes y, debido a las fugas, se puede sobreestimar el suministro efectivamente entregado.

Debido a ello, la falla del servicio de distribución se define según:

$$F(n) = \begin{cases} 1 & \text{si } \frac{n}{N} < u \\ 0 & \text{si } \frac{n}{N} \geq u \end{cases} \quad (2.9)$$

donde $F(n)$ es la función de falla, que retorna 1 en caso de falla y 0 en caso contrario, n es la cantidad de nodos cuya demanda mínima de caudal es satisfecha, N es la cantidad total de nodos que poseen demanda y u es el porcentaje mínimo en forma decimal de suministro – producción permitido.

2.7.2. Índice de presión

El índice de presión es similar al índice de suministro producción en términos de planteamiento, pero la condición para que un nodo pertenezca al conjunto n se basa en la presión mínima. Luego:

$$F(n) = \begin{cases} 1 & \text{si } \frac{n}{N} < v \\ 0 & \text{si } \frac{n}{N} \geq v \end{cases} \quad (2.10)$$

donde $F(n)$ es la función de falla, que retorna 1 en caso de falla y 0 en caso contrario, n es la cantidad de nodos cuya demanda mínima de presión es satisfecha, N es la cantidad total de nodos con demanda de presión y v es el porcentaje mínimo en forma decimal de presión permitido.

3. ORGANIZACIÓN Y DISEÑO DE PROCESOS METODOLÓGICOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ELEMENTOS CRÍTICOS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

3.1. Flujo de trabajo para la identificación de elementos críticos

En esta sección se describen los procesos metodológicos en la identificación de elementos críticos de una red de distribución de agua potable, incluyendo el flujo de información presentado de forma gráfica en la figura 3.1.

3.1.1. Ránking de centralidad

En esta etapa se requiere información sobre la conformación topológica y geométrica de la red de distribución de agua potable. Esta información se emplea para calcular el grado de los nodos, la centralidad de interposición y la centralidad de cercanía; además de identificar los puntos de articulación y los puentes. Luego, se genera un ránking de centralidad basado en estas métricas topológicas que se presenta de forma gráfica para una mejor interpretación y se conserva para establecer posibles correlaciones con los ránkings probabilísticos e hidráulicos.

3.1.2. Modelo hidráulico

Empleando la conformación topológica y geométrica de la red de distribución de agua potable, así como una estimación del comportamiento de la demanda en la red en forma de patrones de consumo, se realiza el modelamiento de la red en su condición normal para un período de una semana

3.1.3. Flujos y presiones basales

Se extraen los flujos de agua y la distribución de presiones resultantes del modelo hidráulico del paso anterior.

3.1.4. Métricas hidráulicas basales

Los valores extraídos en el paso se emplean para calcular las métricas hidráulicas siguientes: porcentaje de nodos con presión mínima satisfecha, porcentaje de nodos con presión requerida satisfecha, disponibilidad del servicio de agua potable, índice de Todini del sistema y entropía del sistema; que corresponden a la representación del comportamiento basal de la red en términos hidráulicos.

3.1.5. Escenarios de falla

Se utiliza el modelo de cada amenaza a considerar, en conjunto con la fragilidad de la red de distribución de agua potable frente a las amenazas, para determinar N estados de impacto. Estos estados corresponden a un muestreo aleatorio de estados de daño que pueden, o no, dar origen a un escenario de falla.

3.1.6. Cálculo de impacto

Se modela la red de distribución de agua potable en todos los estados de daño y se determina el comportamiento hidráulico que esta presenta respecto a las métricas hidráulicas normales. Se utilizan los índices de suministro – producción y de presión para determinar si el escenario conduce a una falla.

3.1.7. Análisis probabilístico por elemento

Se emplean los N escenarios de daño para determinar, a través del cálculo de probabilidad condicionada, qué elementos se correlacionan más o menos con la falla –o no falla– de la red de distribución de agua potable.

3.1.7.1. Ránking estadístico de predictibilidad de falla por elemento

Se ordenan los elementos de acuerdo a la probabilidad de falla global existente dada la falla del i-ésimo elemento.

3.1.7.2. Ránking estadístico de predictibilidad de no falla por elemento

Se ordenan los elementos de acuerdo a la probabilidad de no-falla global existente dada la no-falla del i-ésimo elemento.

3.1.8. Influencia de impactos sobre métricas hidráulicas

Se calculan las métricas hidráulicas para cada uno de los modelos hidráulicos realizados en estados de daño de la red. A partir de ello, se calcula la variación que existe entre el valor basal de estas métricas hidráulicas y el valor tras el impacto.

3.1.8.1. Análisis de recuperación

Se determina el comportamiento de las métricas hidráulicas de caracterización de resiliencia a través del tiempo en un escenario de daño y posterior reparación.

3.1.8.2. Resiliencia

Se emplea el análisis de recuperación para calcular un índice de resiliencia que permita comparar los efectos de cada uno de los métodos de priorización, de origen topológico como probabilístico. Los resultados se utilizan para caracterizar los métodos de priorización de reparación en términos de su impacto sobre la resiliencia medida a partir de diferentes métricas hidráulicas.

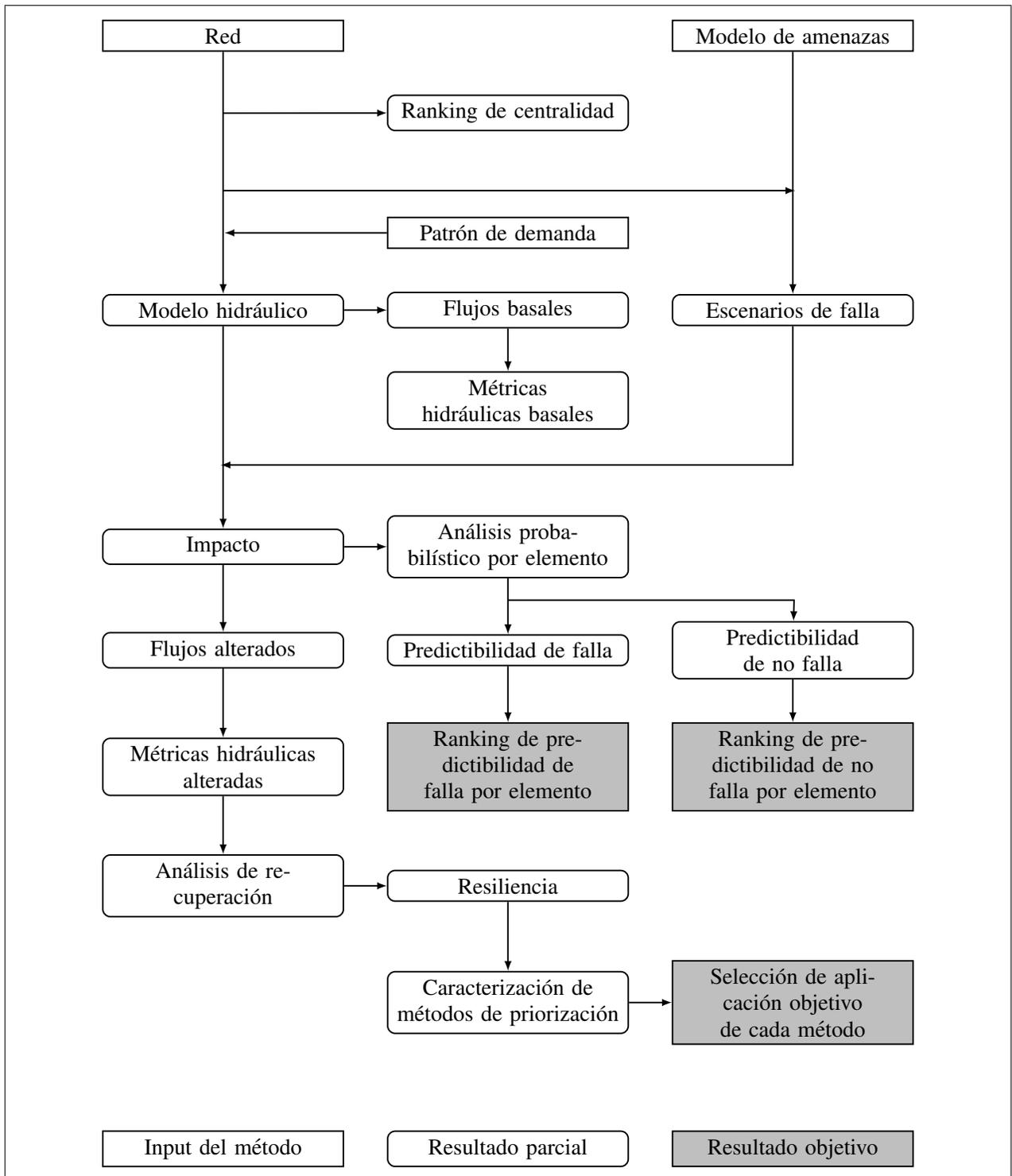


Figura 3.1. Diagrama de procesos metodológicos. Elaboración propia.

4. APLICACIÓN SOBRE REDES EXPERIMENTALES

4.1. Red experimental

4.1.1. Topología

Se emplea una red generada a partir de los parámetros descritos en la tabla 4.1. La red de prueba se presenta en la figura 4.1, mientras que los índices de centralidad asociados a su topología se presentan en las figuras 4.2 a 4.6.

Tabla 4.1. Parámetros de la red de pruebas. Fuente: elaboración propia.

Amplitud (Este - Oeste) [m]	45
Amplitud (Norte - Sur) [m]	64
Pendiente [-]	0.15
Número de nodos (Este - Oeste) [-]	4
Número de nodos (Norte - Sur) [-]	5
Número de fuentes [-]	4

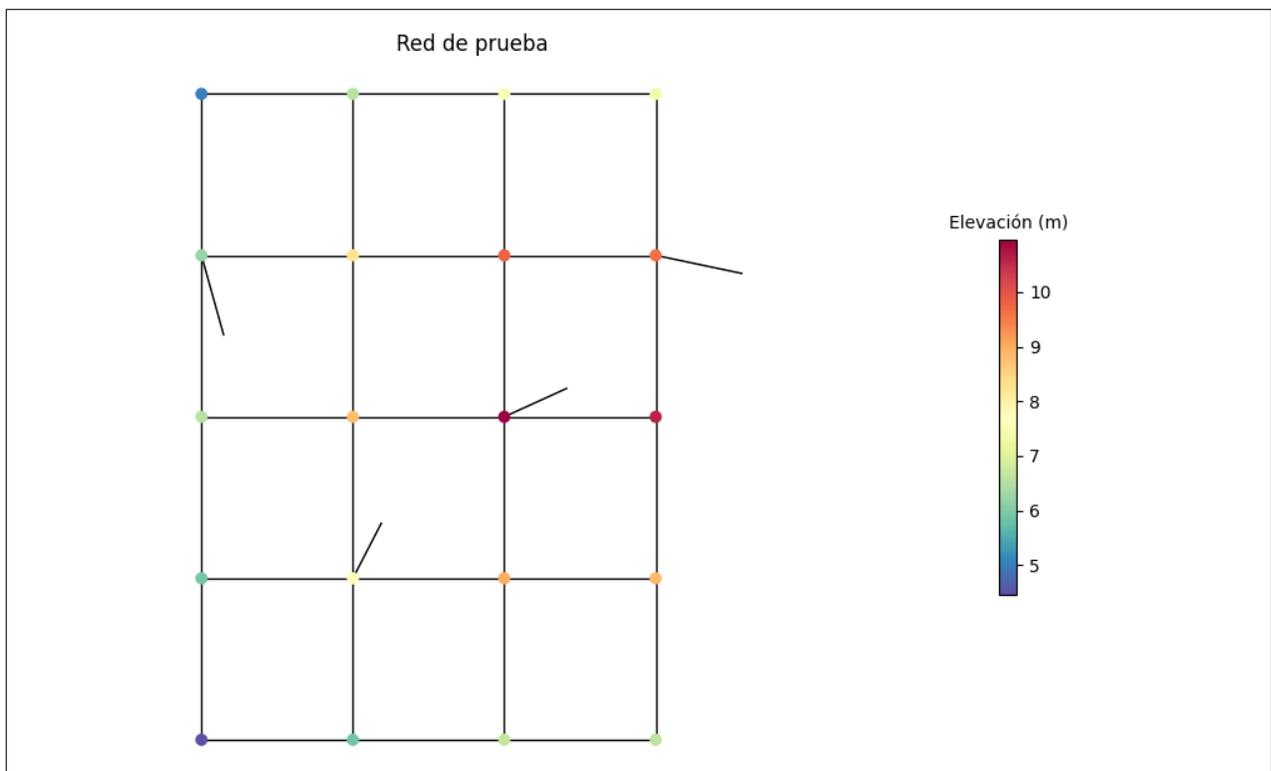


Figura 4.1. Red de prueba. Fuente: elaboración propia.

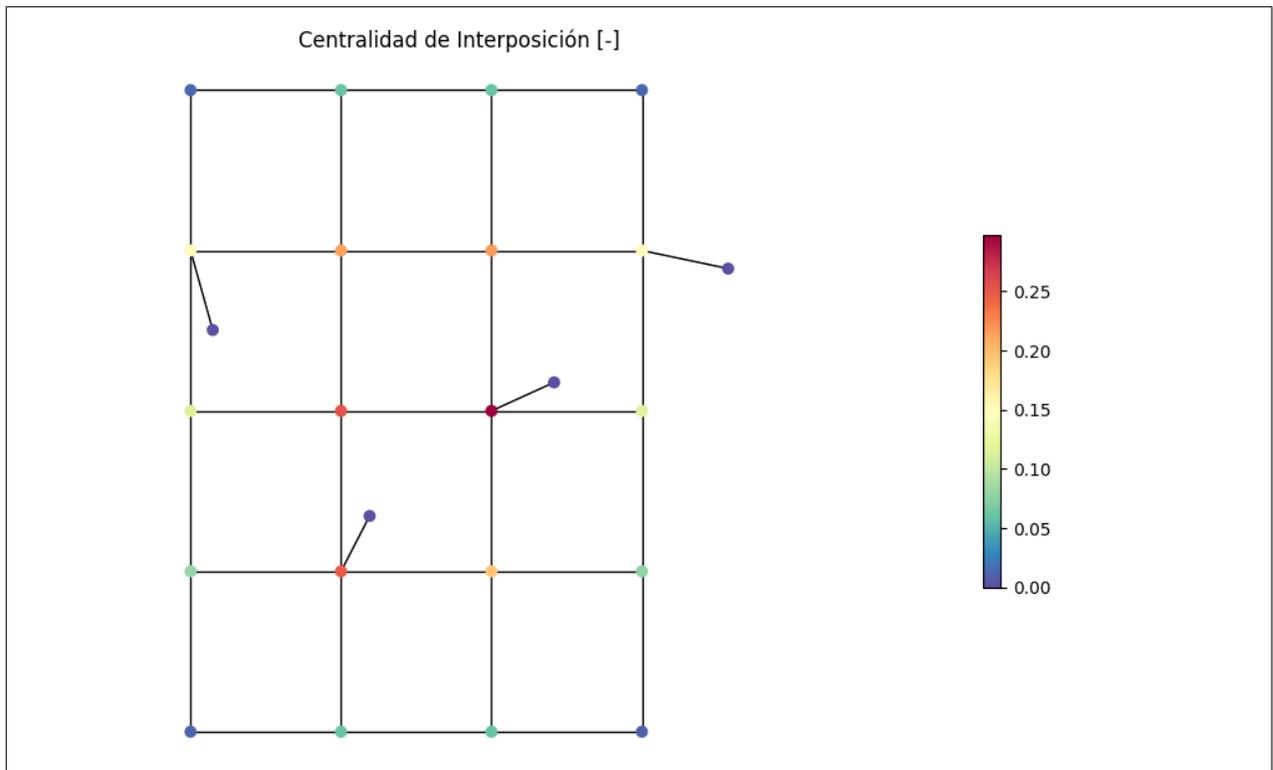


Figura 4.2. Centralidad de cercanía de los nodos de la red de prueba. Fuente: elaboración propia.

4.1.2. Patrón de demanda

Se determina un patrón arbitrario de consumo asociado a una semana regular de uso del servicio de agua potable por parte de los consumidores. El patrón se presenta en la figura 4.7 y se asigna a cada uno de los nodos de la red experimental.

4.1.3. Caracterización de amenazas

La amenaza sísmica se caracteriza por una fuente sismogénica ubicada 70 kilómetros al este de la red. Por su parte, la amenaza de inundación es caracterizada por una altura de inundación, que corresponde a la tercera parte de la amplitud altimétrica de la red.

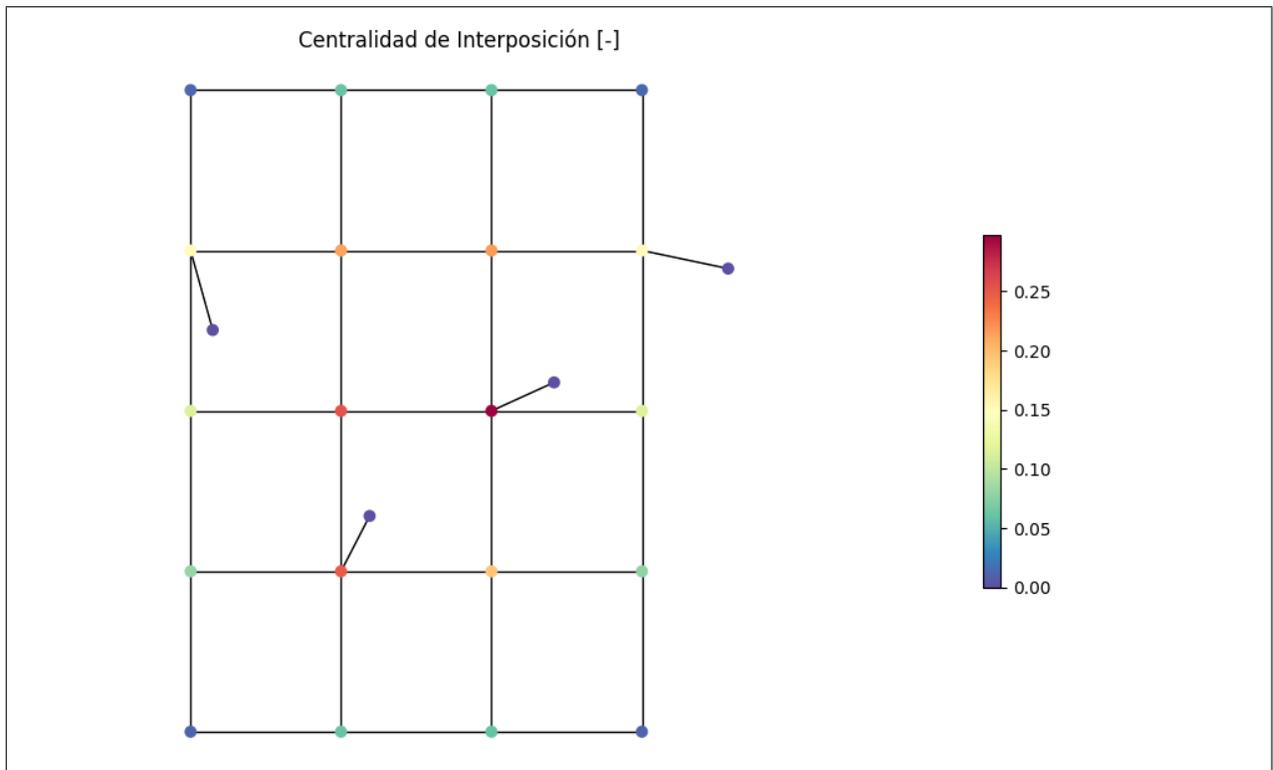


Figura 4.3. Centralidad de interposición de los nodos de la red de prueba. Fuente: elaboración propia.

4.1.4. Caracterización de fragilidad

Se utilizan las curvas de fragilidad desarrolladas en una investigación previa (Garvs, 2020), que relacionan una distribución de probabilidad de falla log-normal, cuyo parámetro es la aceleración máxima del suelo (PGA) expresada según su valor relativo a la aceleración de gravedad en la superficie de la Tierra bajo condiciones estándar. Las constantes de caracterización de fragilidad se presentan en la tabla 4.2, mientras que las curvas se ilustran en la figura 4.8.

Tabla 4.2. Constantes para las curvas de fragilidad empleadas en el modelamiento. Fuente: Garvs (2020).

Mayor		Moderado	
Promedio	Desviación	Promedio	Desviación
0,4996	0,2849	0.735	0.240

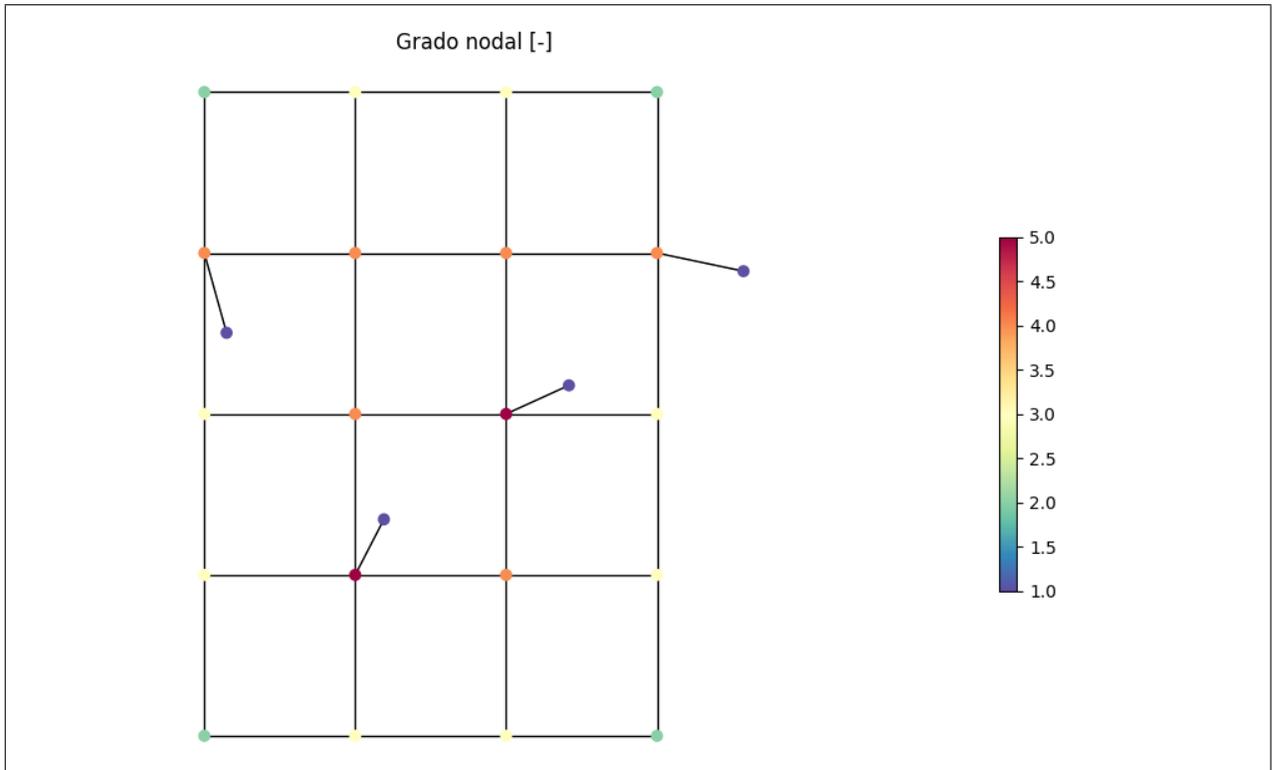


Figura 4.4. Grado de los nodos de la red de prueba. Fuente: elaboración propia.

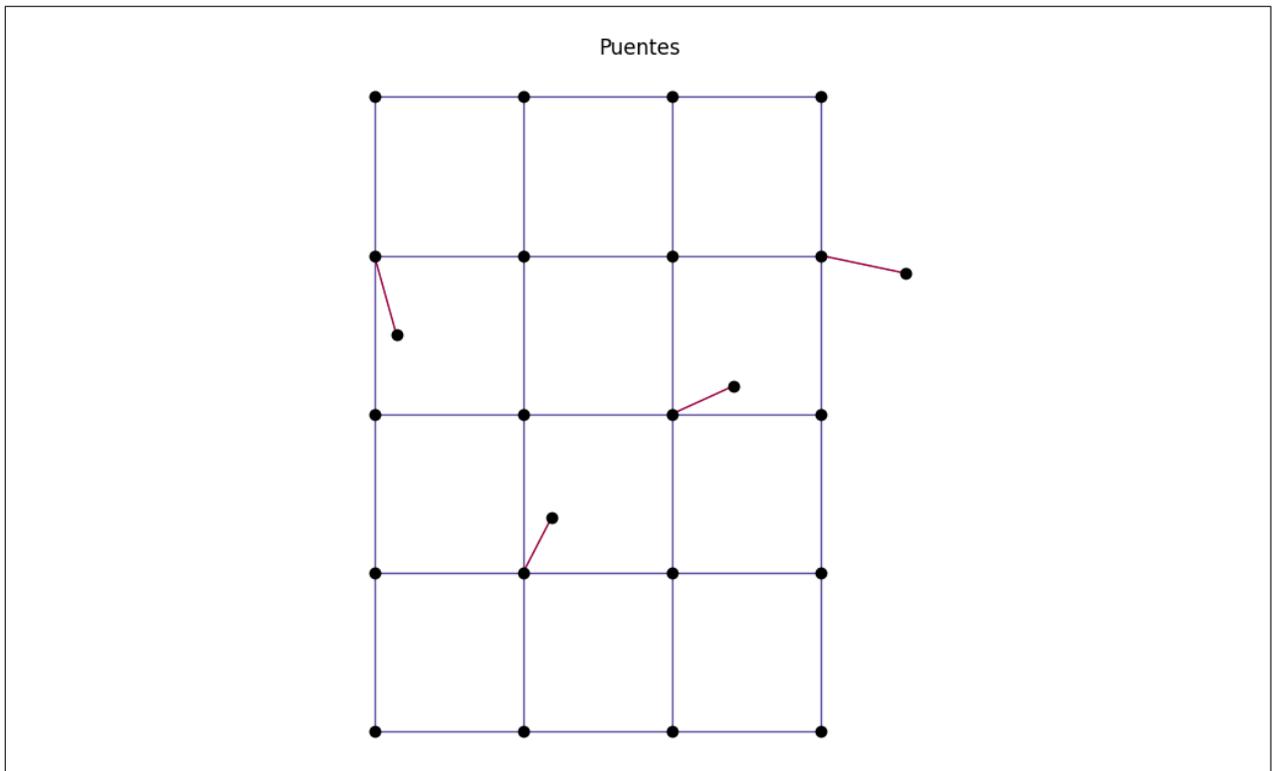


Figura 4.5. Puentes de la red de prueba. Fuente: elaboración propia.

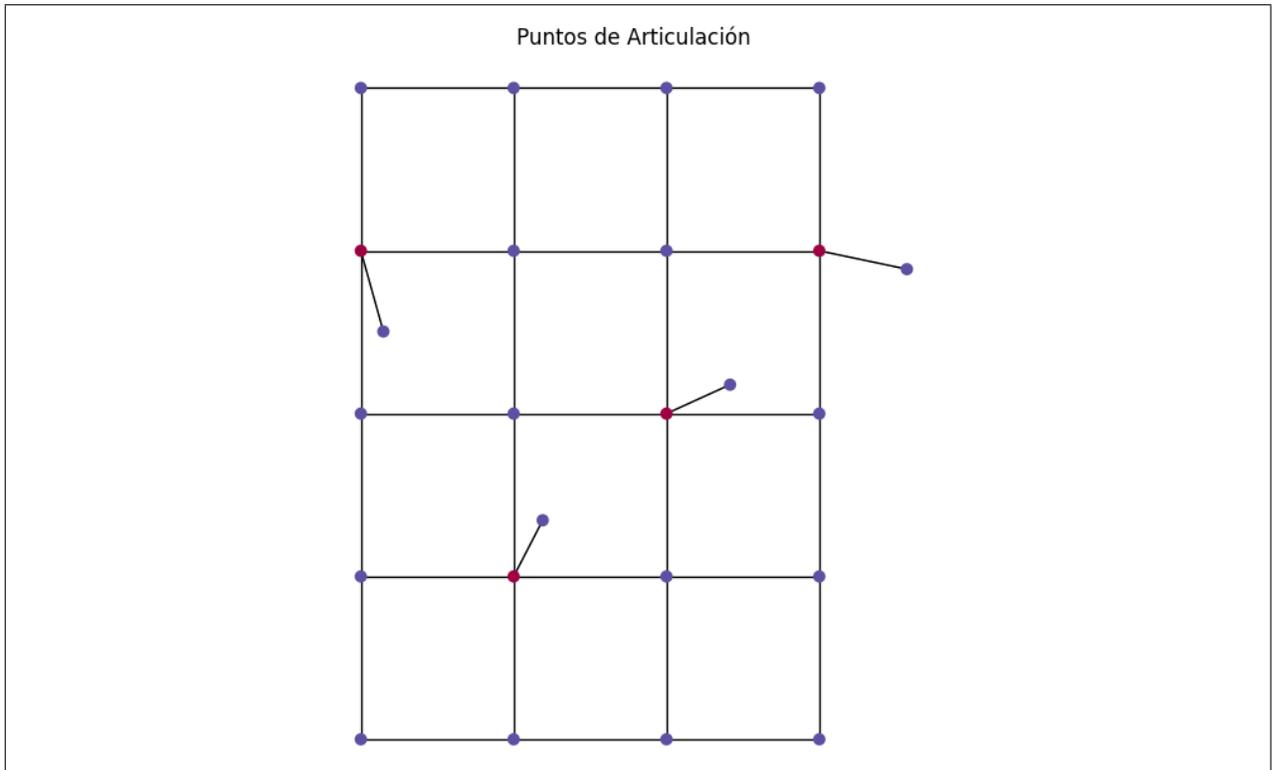


Figura 4.6. Puntos de articulación de la red de prueba. Fuente: elaboración propia.

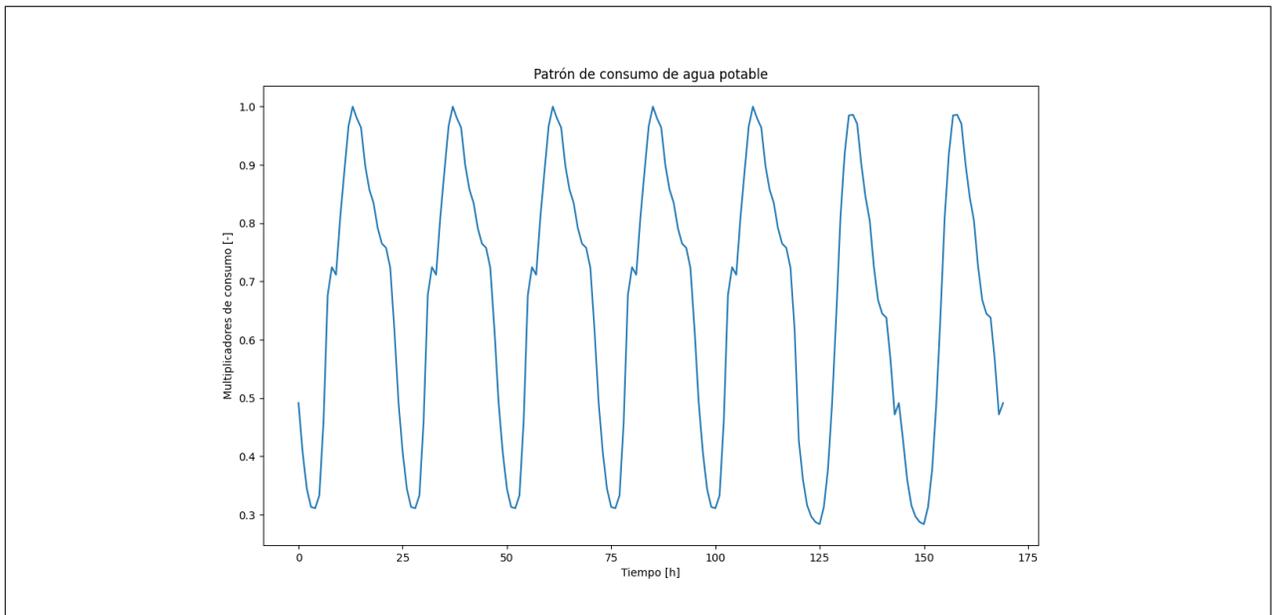


Figura 4.7. Patrón arbitrario de demanda. Fuente: elaboración propia.

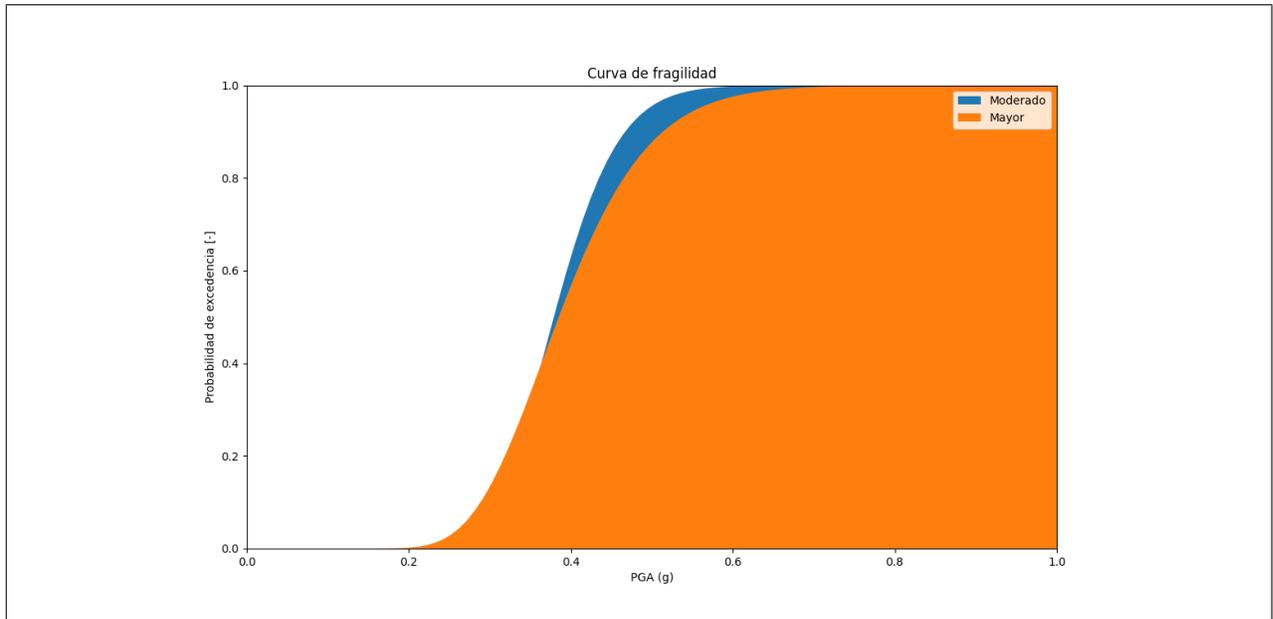


Figura 4.8. Curvas de fragilidad para grados de daño moderado y mayor. Fuente: elaboración propia.

4.1.5. Metamodelo para amenazas múltiples

El metamodelo para dos sismos consecutivos captura los daños consecutivos a través de una magnificación de la falla de un elemento que resulta dañado por ambos eventos. En particular, se realiza un aumento de las áreas de fuga asociadas a las fallas iniciales en caso de que el elemento en estado de falla perciba daño de un segundo evento sísmico. En caso de que el segundo evento resulte ser de inundación, se considera que una tubería en estado de daño moderado pasa a presentar daño mayor debido a la secuencia de daño.

4.2. Simulación hidráulica

A partir de la caracterización de la red de prueba, en términos topológicos como de demanda, se procede a simular el comportamiento hidráulico que la red tiene, con interés en determinar el comportamiento de las métricas hidráulicas involucradas en el proceso de descripción del desempeño de la red como de la resiliencia.

4.2.1. Métricas hidráulicas

Las métricas hidráulicas se estudian en relación a los valores basales que estas presentan. En las figuras 4.9 a 4.13 se presentan ejemplos del comportamiento que presentan las métricas hidráulicas a través del normal funcionamiento de la red de pruebas.

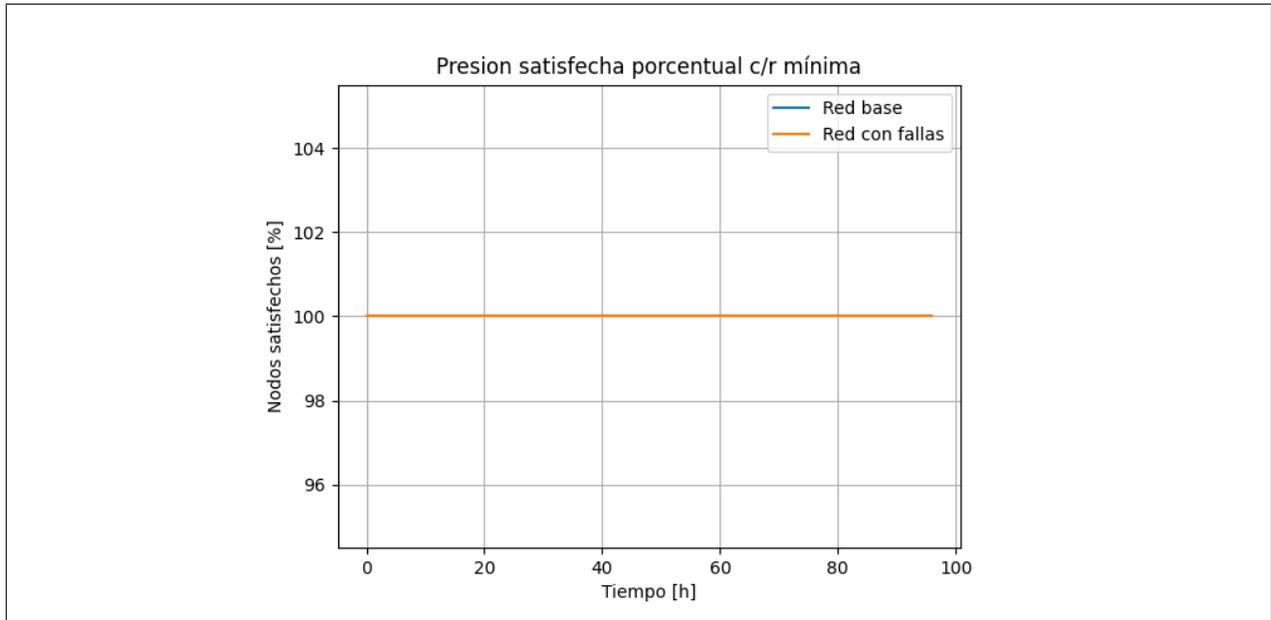


Figura 4.9. Comportamiento basal del porcentaje de nodos cuya presión supera el umbral mínimo de servicialidad. Fuente: elaboración propia.

4.2.1.1. Comportamiento estadístico

A partir de 700 escenarios de estrés debido a eventos consecutivos de sismo e inundación, se realiza un análisis estadístico descriptivo sobre el comportamiento que presentan las diferentes métricas hidráulicas, utilizando el concepto de probabilidades totales, obteniendo así la tasa de excedencia de déficit de cada una de las métricas hidráulicas frente a una amenaza determinística. Por otro lado, los escenarios de falla, para una disminución de desempeño mayor a cierta tolerancia, se emplean en el Método de Muestreo Simple de Montecarlo. A partir de ello, se obtiene la estadística descriptiva que permite estimar la probabilidad de falla de la red a partir de la disminución en los valores de las métricas hidráulicas.

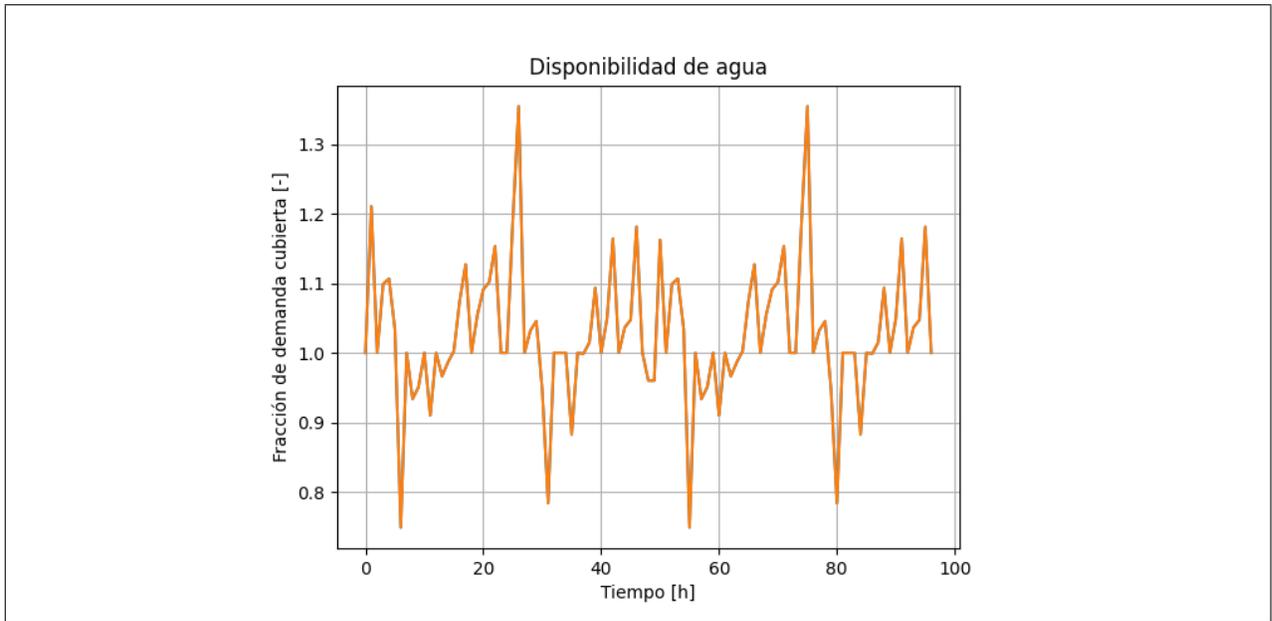


Figura 4.10. Comportamiento basal del porcentaje de la disponibilidad del servicio de agua potable. Fuente: elaboración propia.

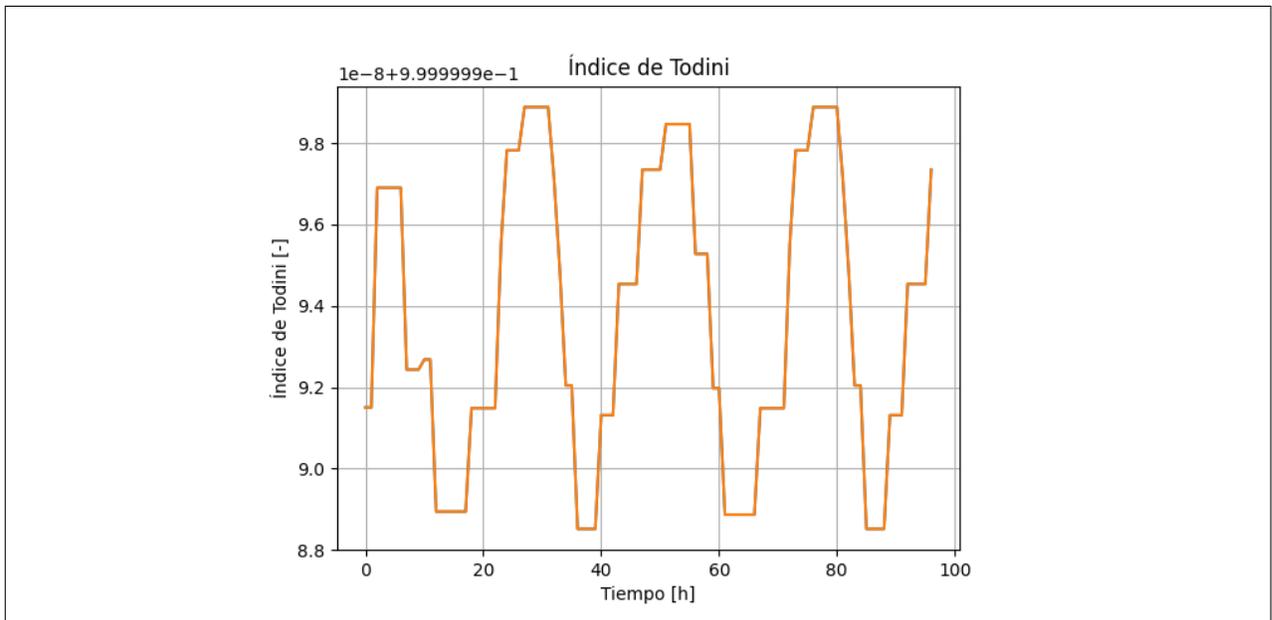


Figura 4.11. Comportamiento basal del Índice de Todini. Fuente: elaboración propia.

El comportamiento descriptivo de las métricas hidráulicas generado con probabilidades totales se presenta en las figuras 4.14 a 4.18; mientras que el modelo de predictibilidad de falla desarrollado se presenta en las figuras 4.19 a 4.23.

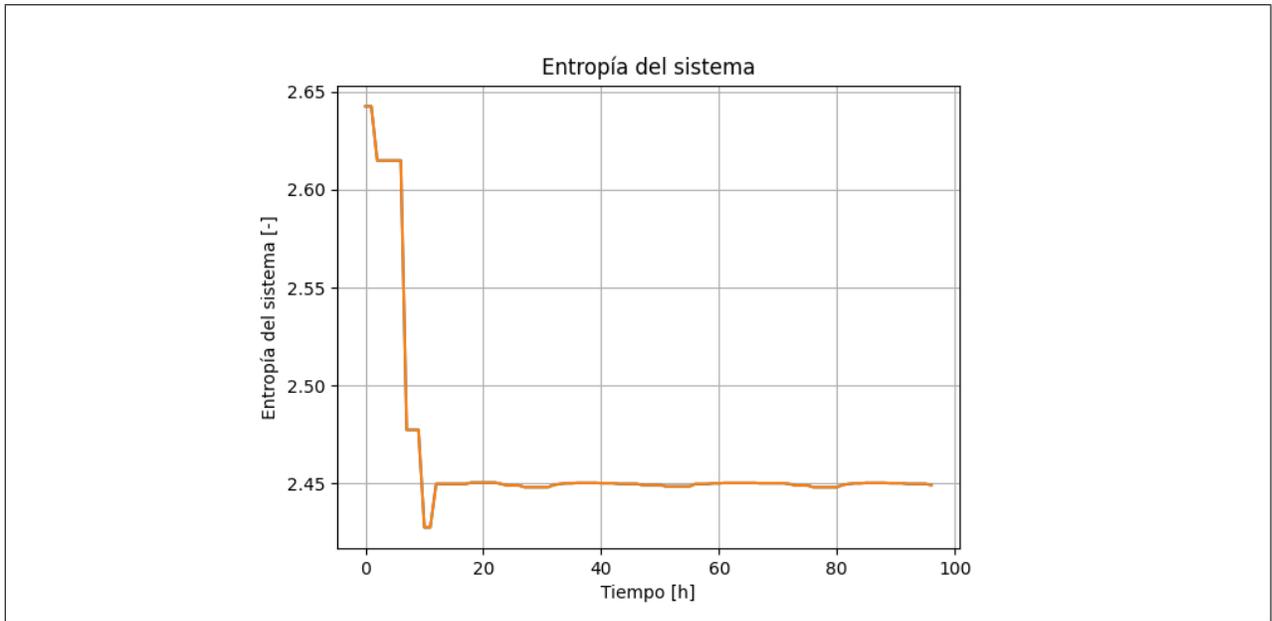


Figura 4.12. Comportamiento basal de la entropía del sistema de distribución.
Fuente: elaboración propia.

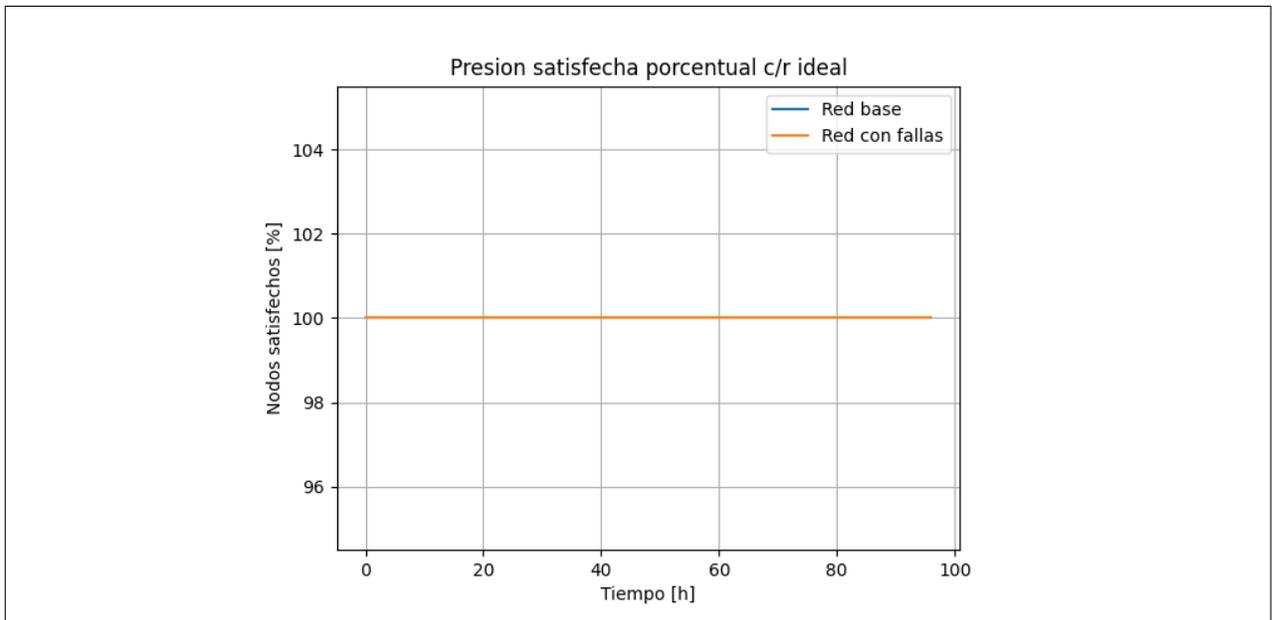


Figura 4.13. Comportamiento basal del porcentaje de nodos cuya presión supera el umbral requerido de desempeño. Fuente: elaboración propia.

A partir del análisis estadístico realizado sobre el muestreo anterior, se determina que el comportamiento de algunas variables se puede modelar como una distribución normal. Para realizar

Tabla 4.3. Parámetros de la función de probabilidad distribuida que modela el comportamiento de las variables hidráulicas.

Variable modelada	μ	σ
Variación de disponibilidad del servicio de agua potable (WSA)	-0,57	0,06
Variación de Entropía	0,01	0,12

esta aseveración, se emplea el test de Shapiro (Brzezinski, 2012) para determinar, con una confianza de 90%, que esto posee consistencia suficiente para no ser rechazado y se estima, después de este test, que el comportamiento de las variables sigue las distribuciones de probabilidad normales de fórmula según la ecuación 4.1 y de parámetros según la tabla 4.3.

$$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.1)$$

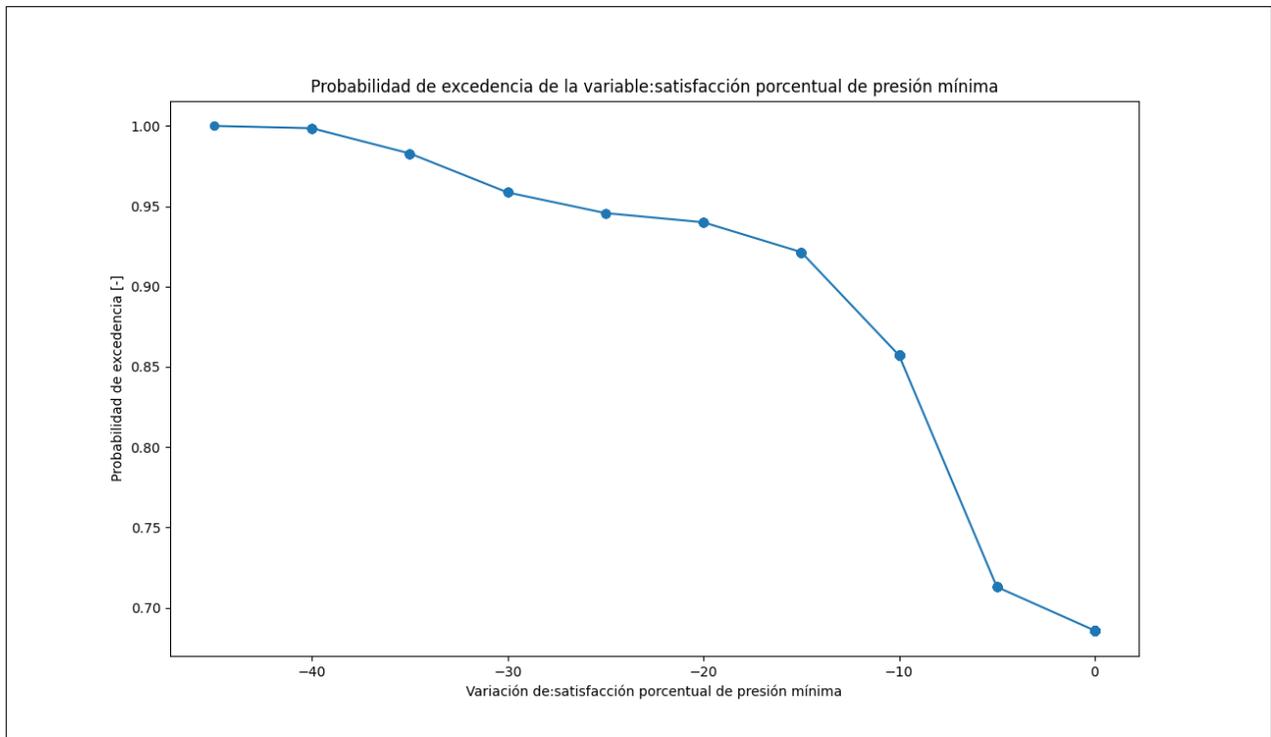


Figura 4.14. CDF: variación de la satisfacción porcentual de nodos con la presión mínima funcional. Fuente: elaboración propia.

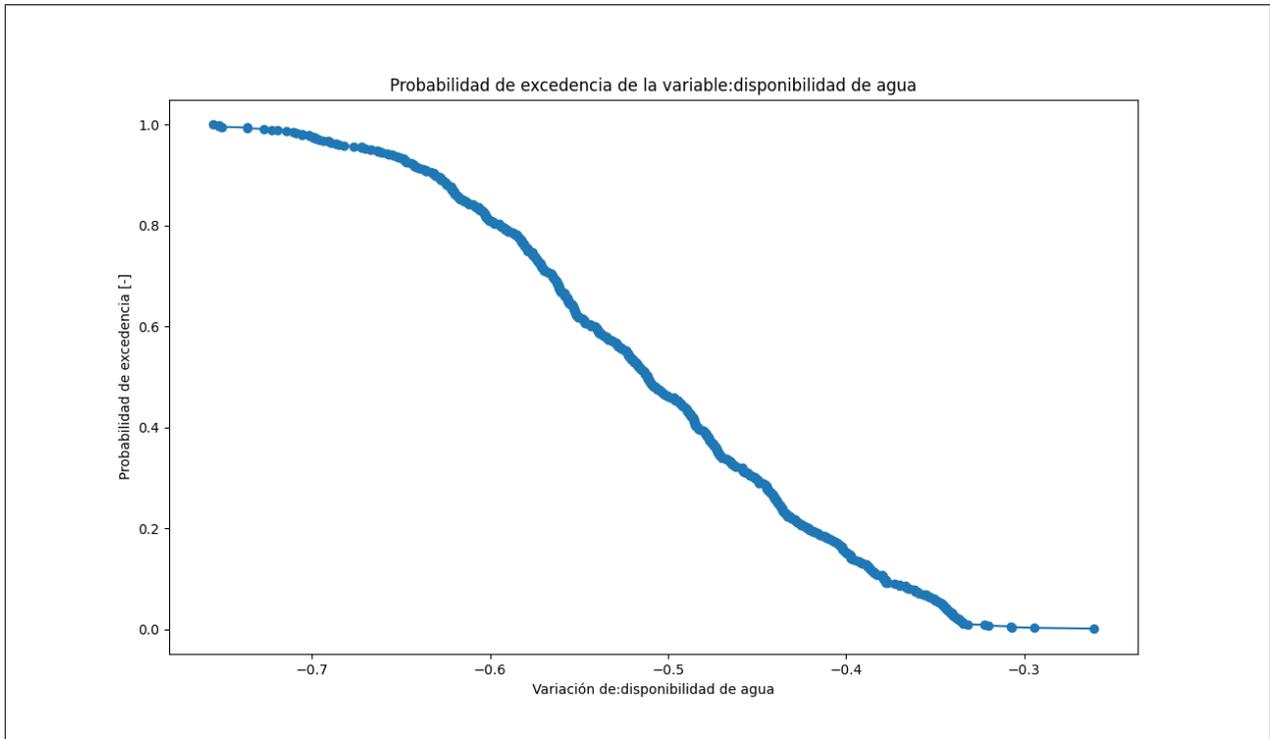


Figura 4.15. CDF: variación de la disponibilidad del servicio de agua. Fuente: elaboración propia.

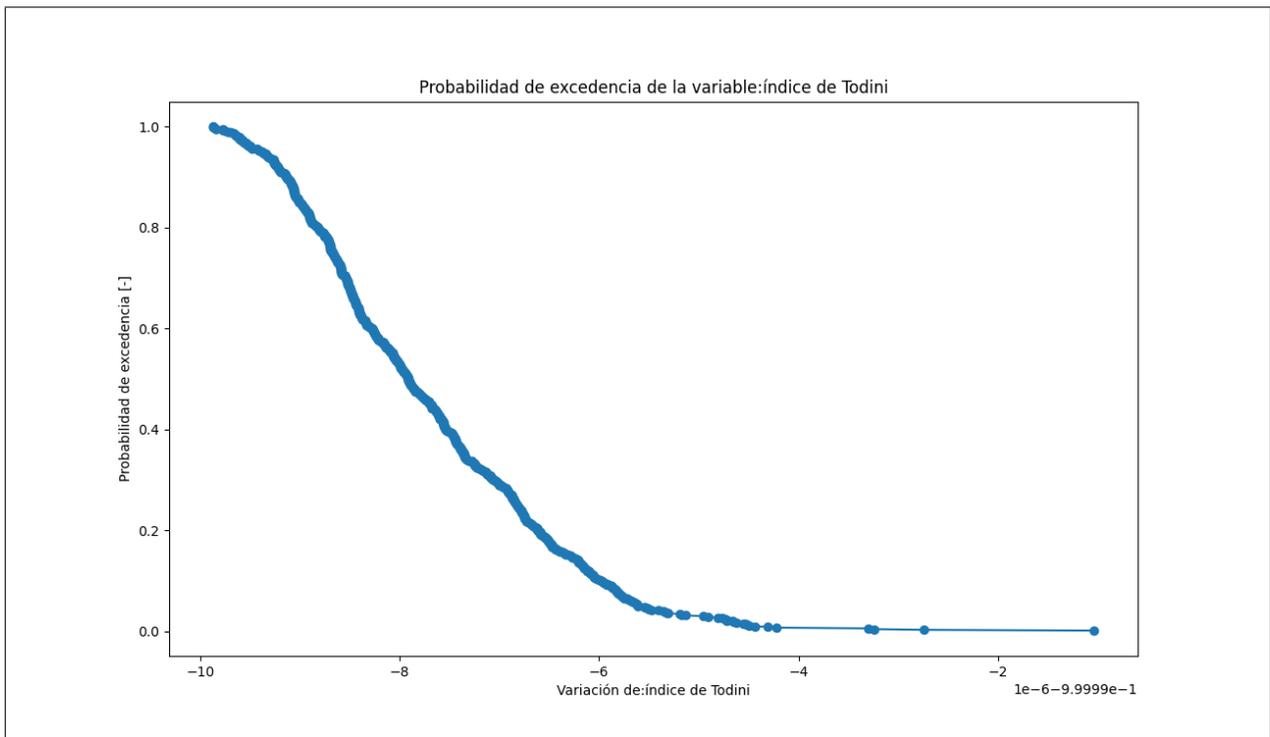


Figura 4.16. CDF: variación del Índice de Todini. Fuente: elaboración propia.

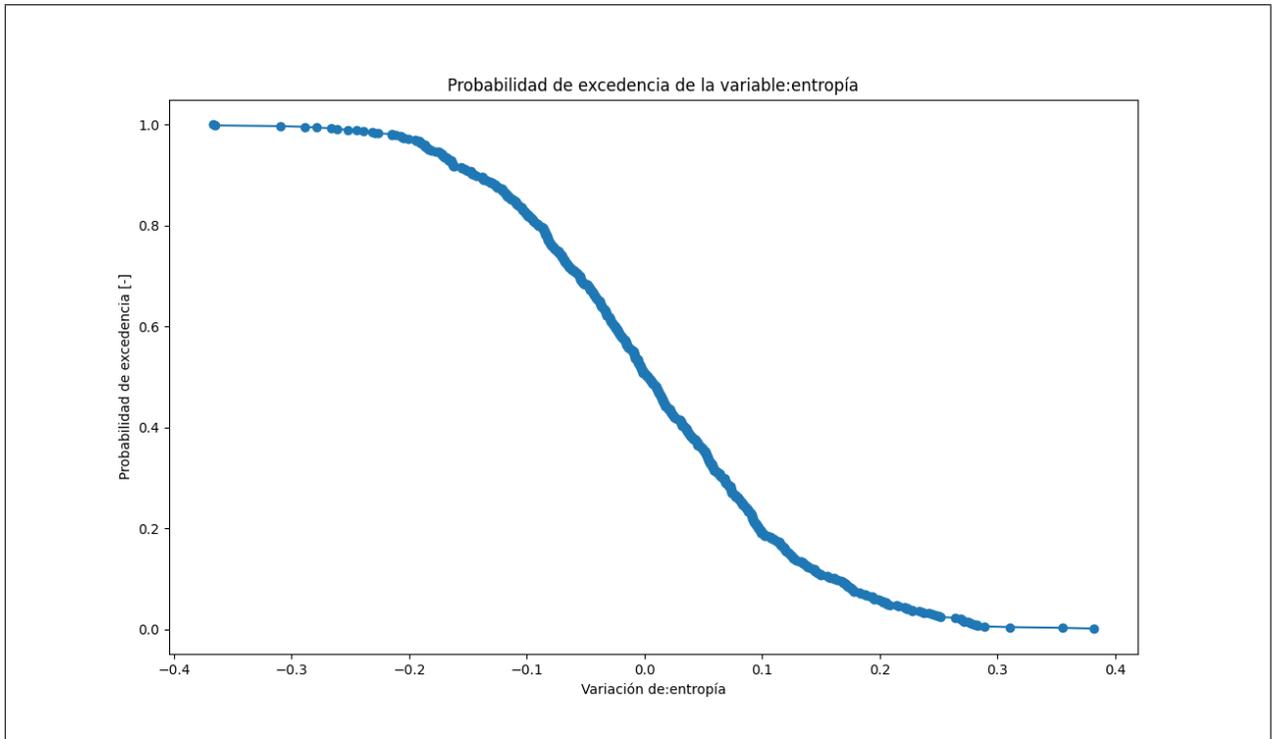


Figura 4.17. CDF: variación de la entropía. Fuente: elaboración propia.

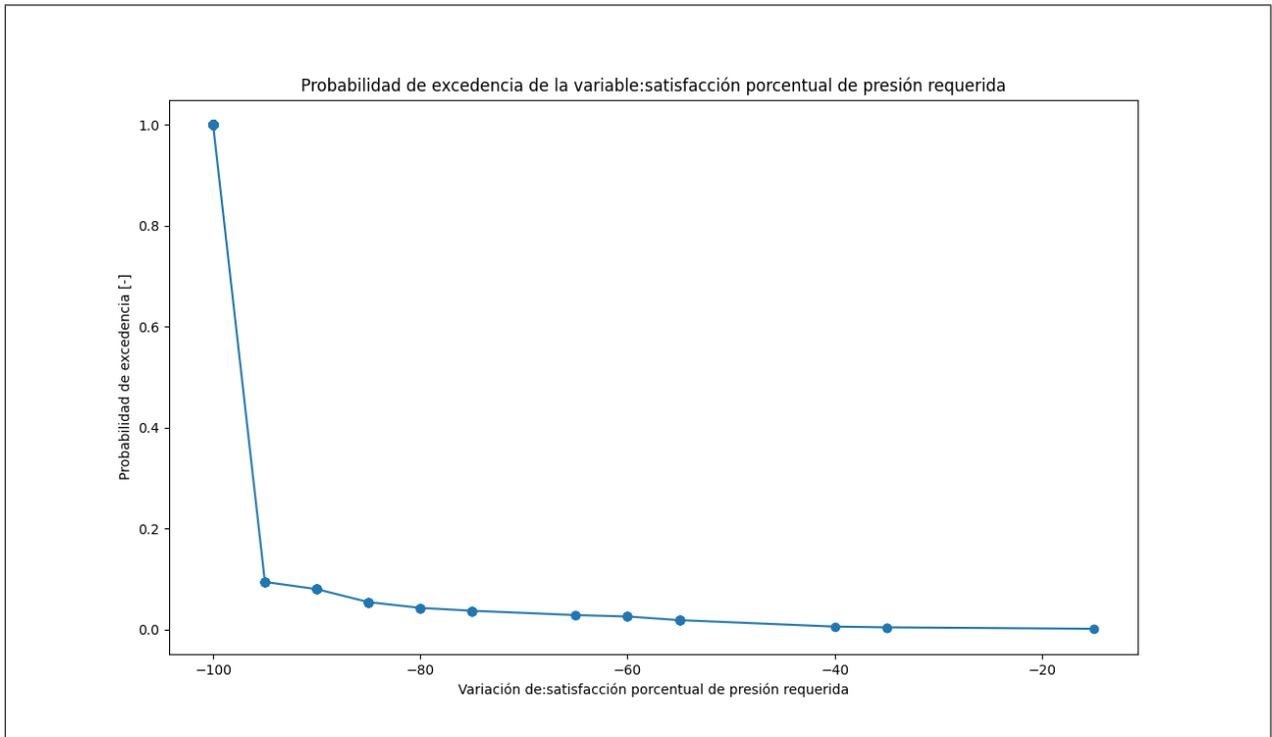


Figura 4.18. CDF: variación del porcentaje de nodos satisfechos con la presión requerida. Fuente: elaboración propia.

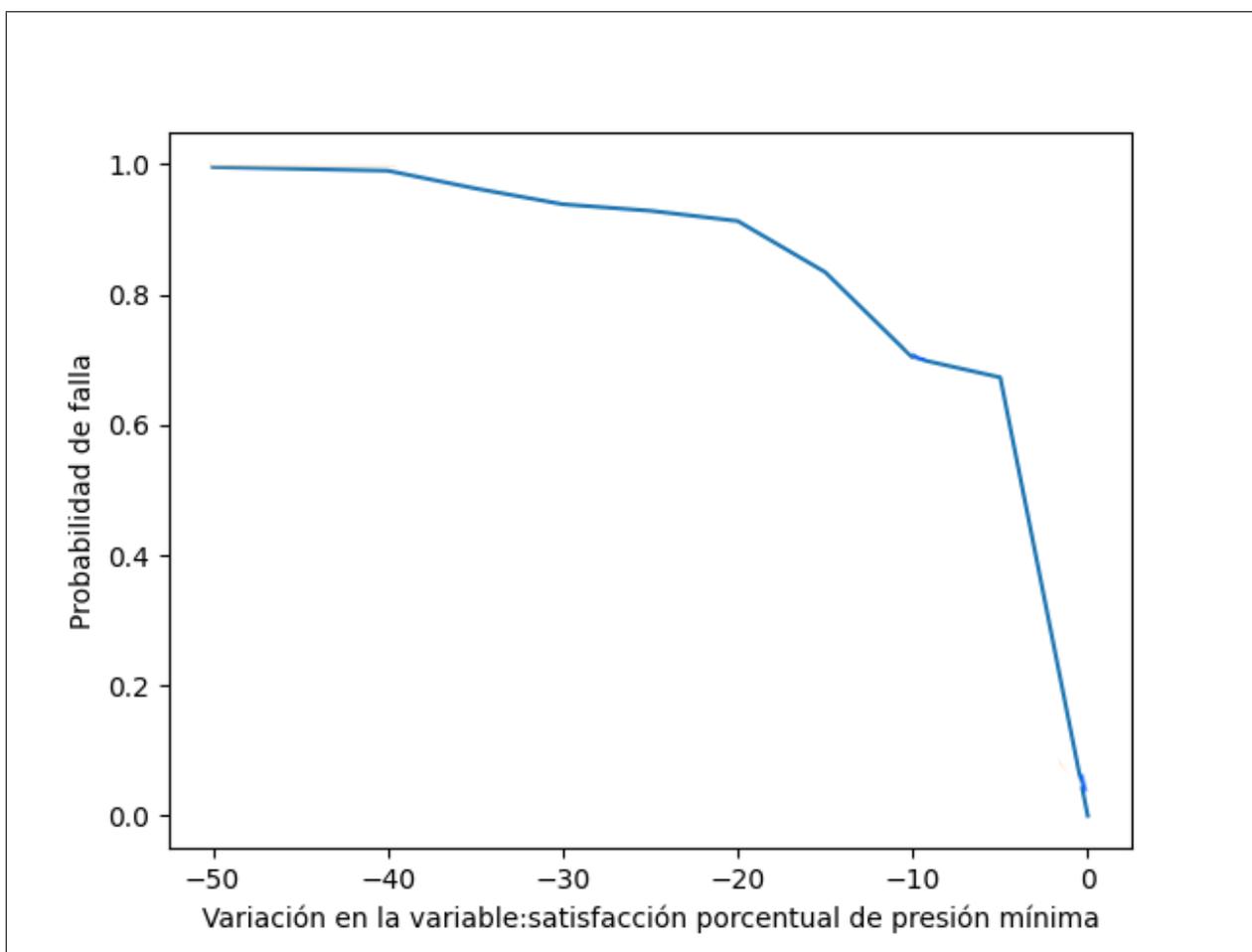


Figura 4.19. Predictibilidad de falla a partir de la disminución del porcentaje de nodos satisfechos con presión mínima. Fuente: elaboración propia.

4.2.1.2. Ejemplos de variaciones en estado de daño

Cuando algunos de los elementos de la red de distribución de agua potable presentan daños, esto conlleva a diferentes estados de desempeño de los elementos que impactan directamente sobre el estado de desempeño de la red. Con la finalidad de cuantificar la influencia de los impactos de las múltiples amenazas naturales sobre los elementos de la red y, por lo tanto, sobre el desempeño general, se analiza el comportamiento de las métricas hidráulicas de desempeño y de resiliencia frente a forzantes asociadas a la expresión de amenazas sísmicas consecutivas como de sismo y posterior inundación. Ejemplos de este tipo de comparación pueden observarse de forma gráfica en las figuras 4.24 a 4.28.

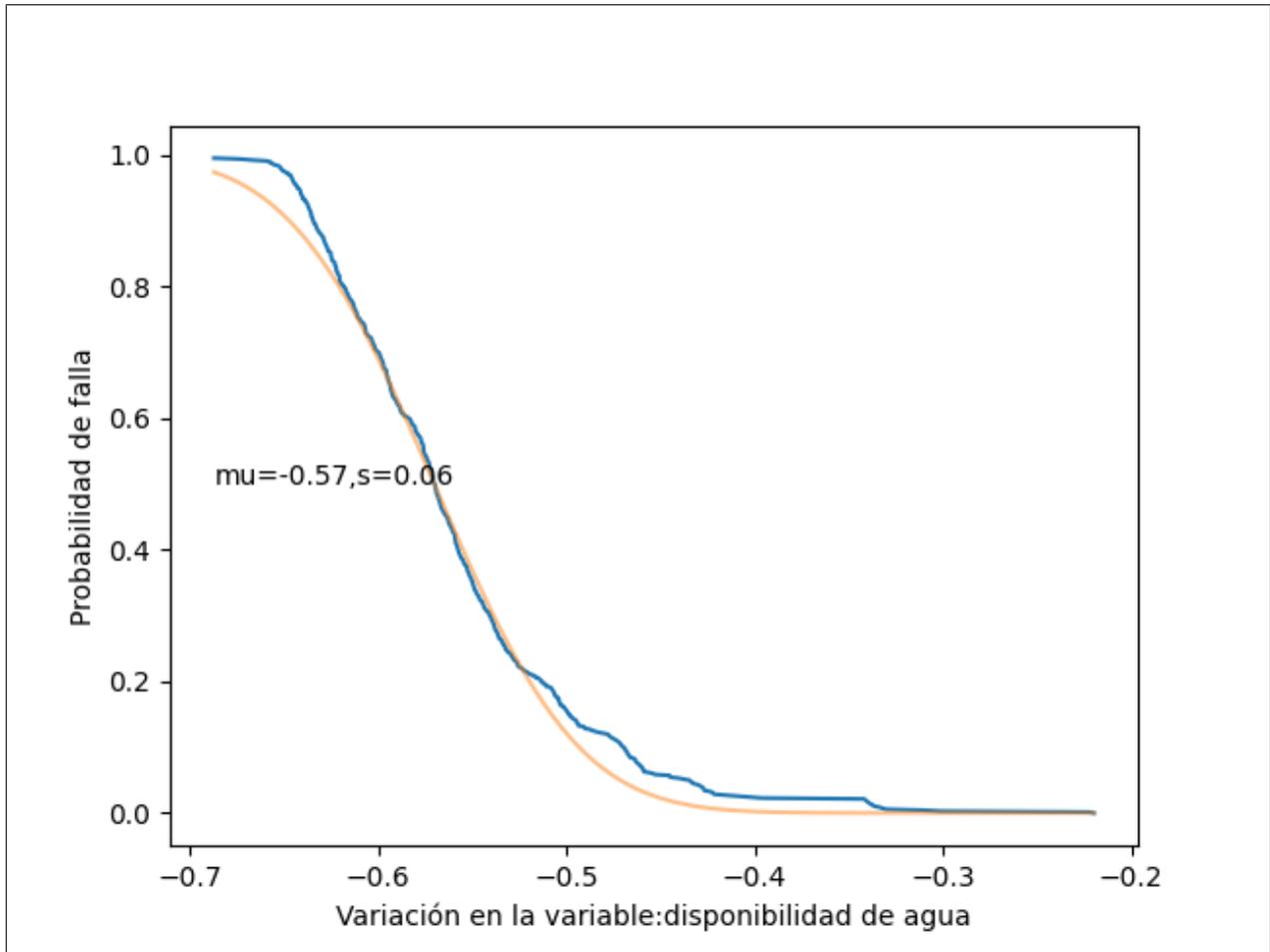


Figura 4.20. Predictibilidad de falla y ajuste estadístico a partir de la disminución de la disponibilidad del servicio de agua potable. Fuente: elaboración propia.

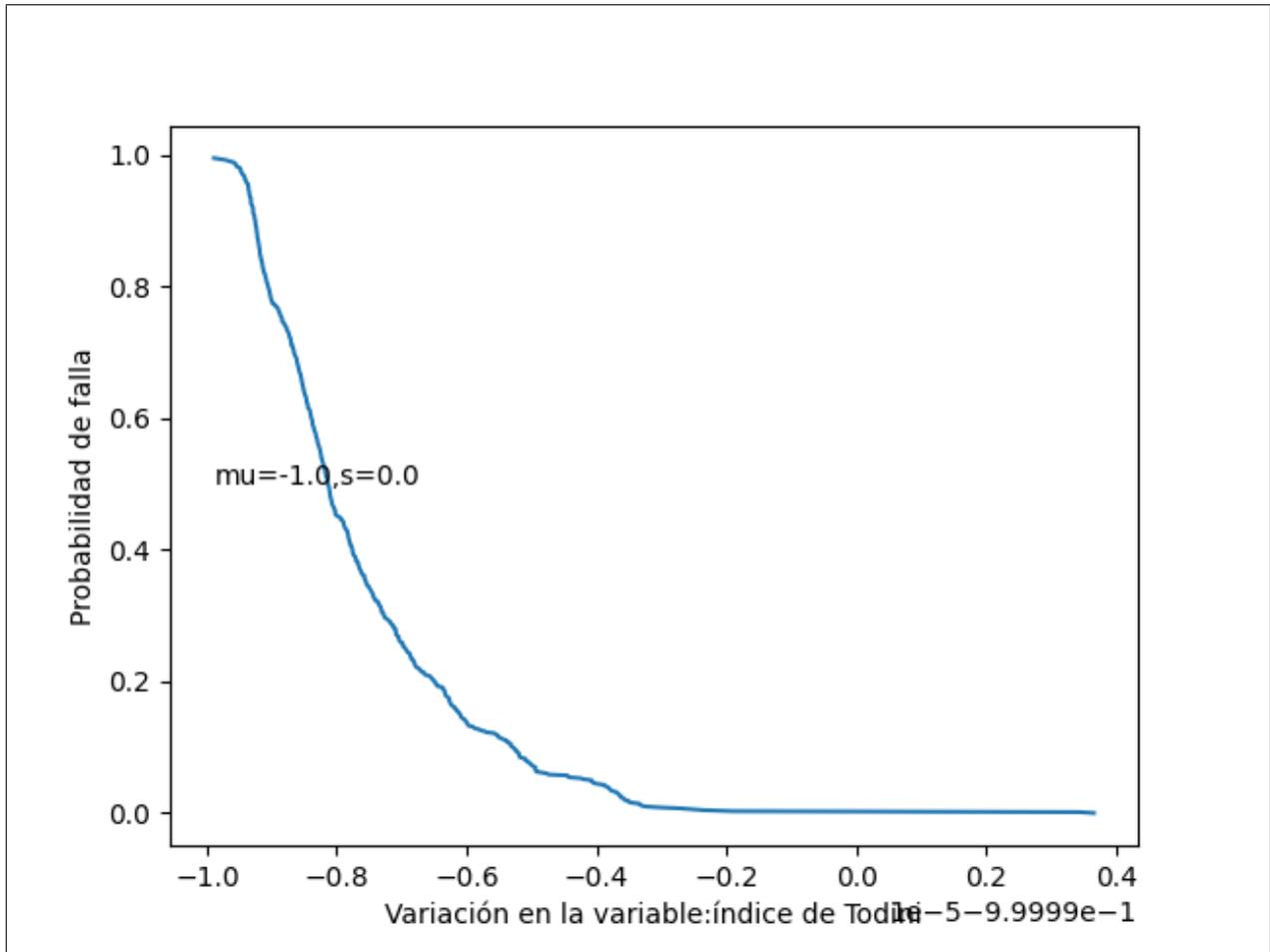


Figura 4.21. Predictibilidad de falla a partir de la disminución del índice de Todini.
Fuente: elaboración propia.

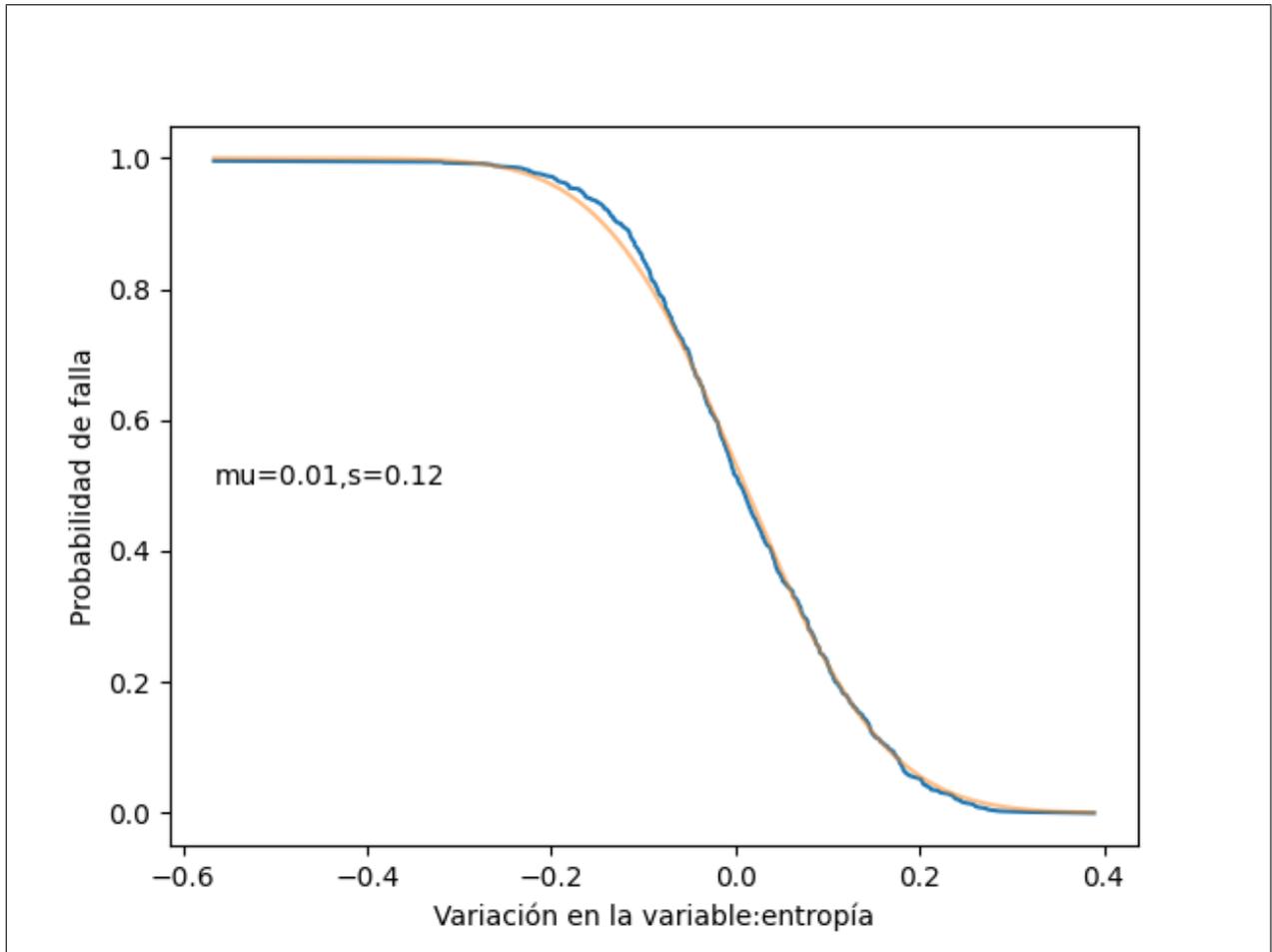


Figura 4.22. Predictibilidad de falla a partir de la variación de entropía. Fuente: elaboración propia.

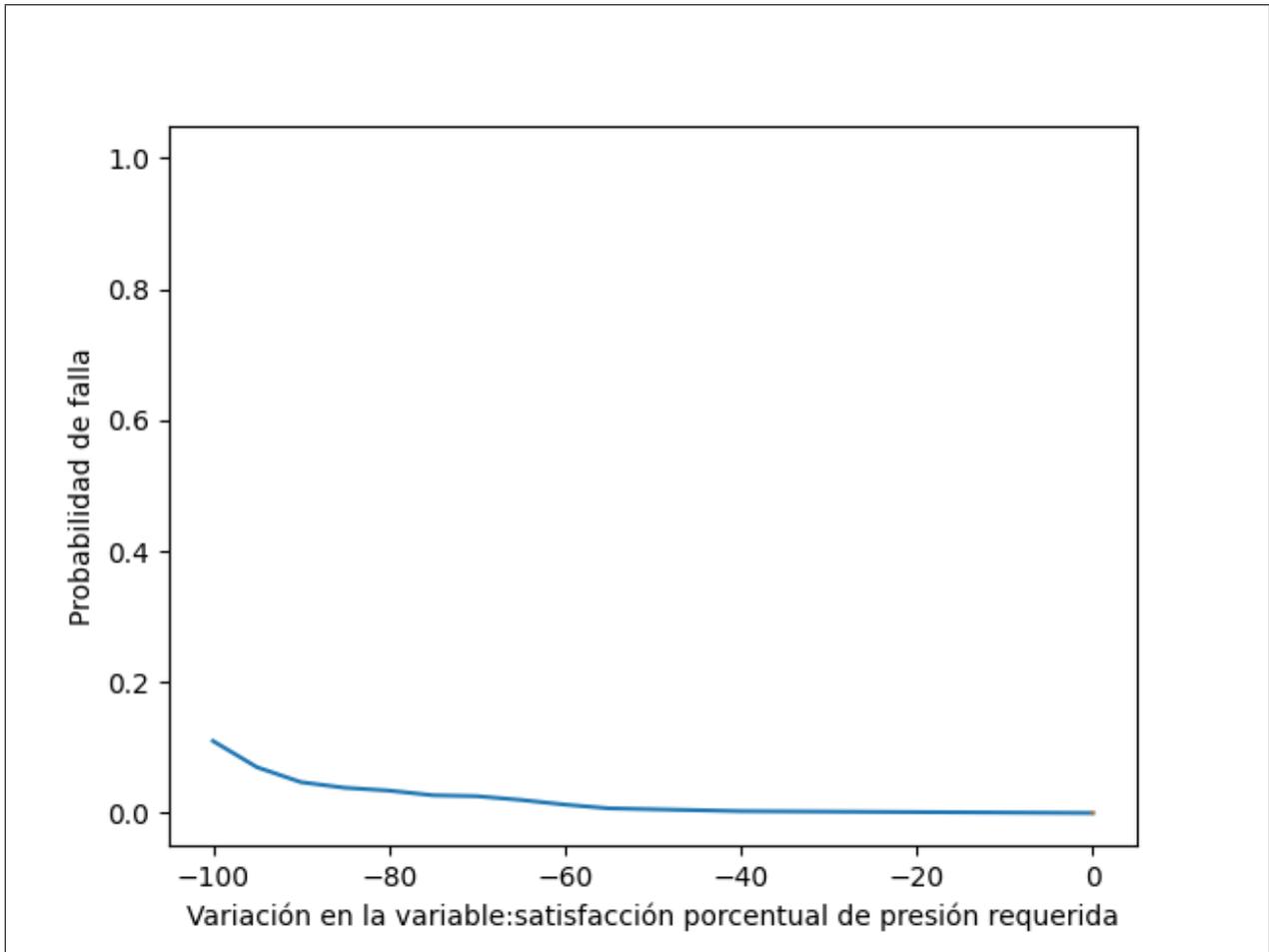


Figura 4.23. Predictibilidad de falla a partir de la disminución del porcentaje de nodos satisfechos con presión requerida. Fuente: elaboración propia.

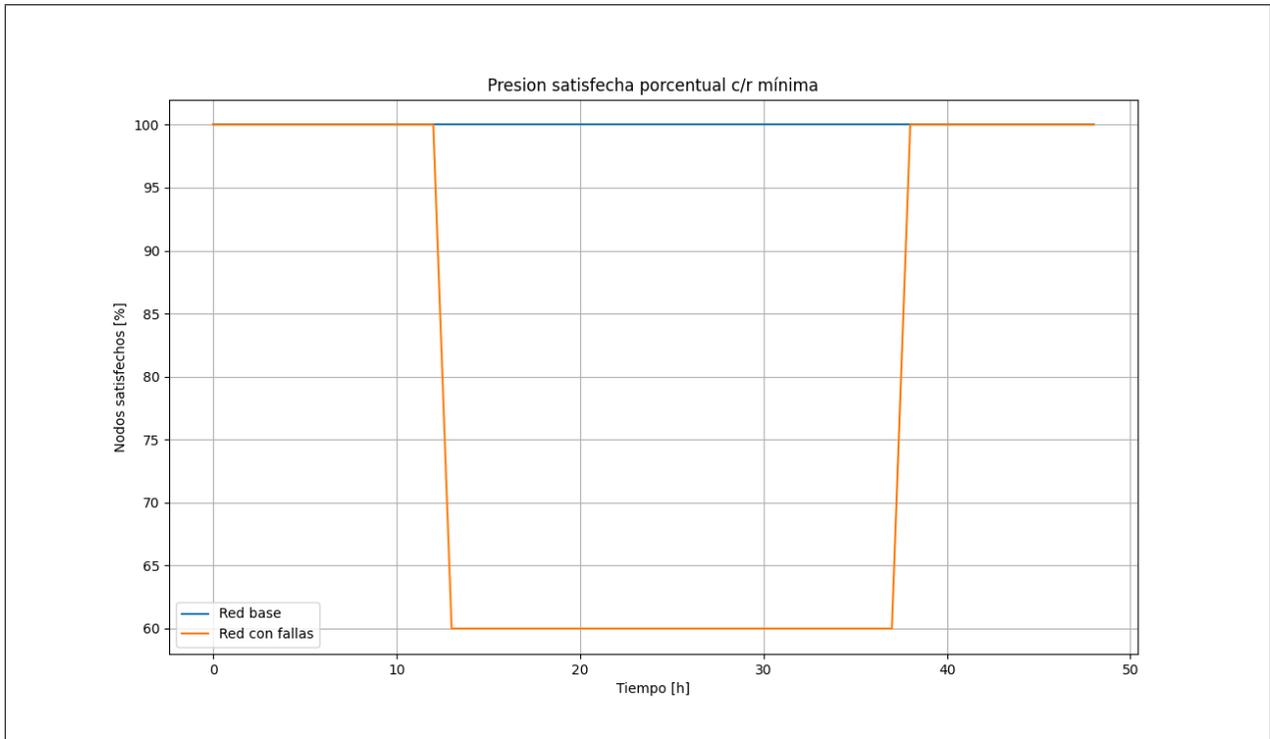


Figura 4.24. Variaciones de porcentaje de nodos satisfechos con la presión mínima funcional (anaranjado) en relación a la métrica basal (azul). Fuente: elaboración propia.

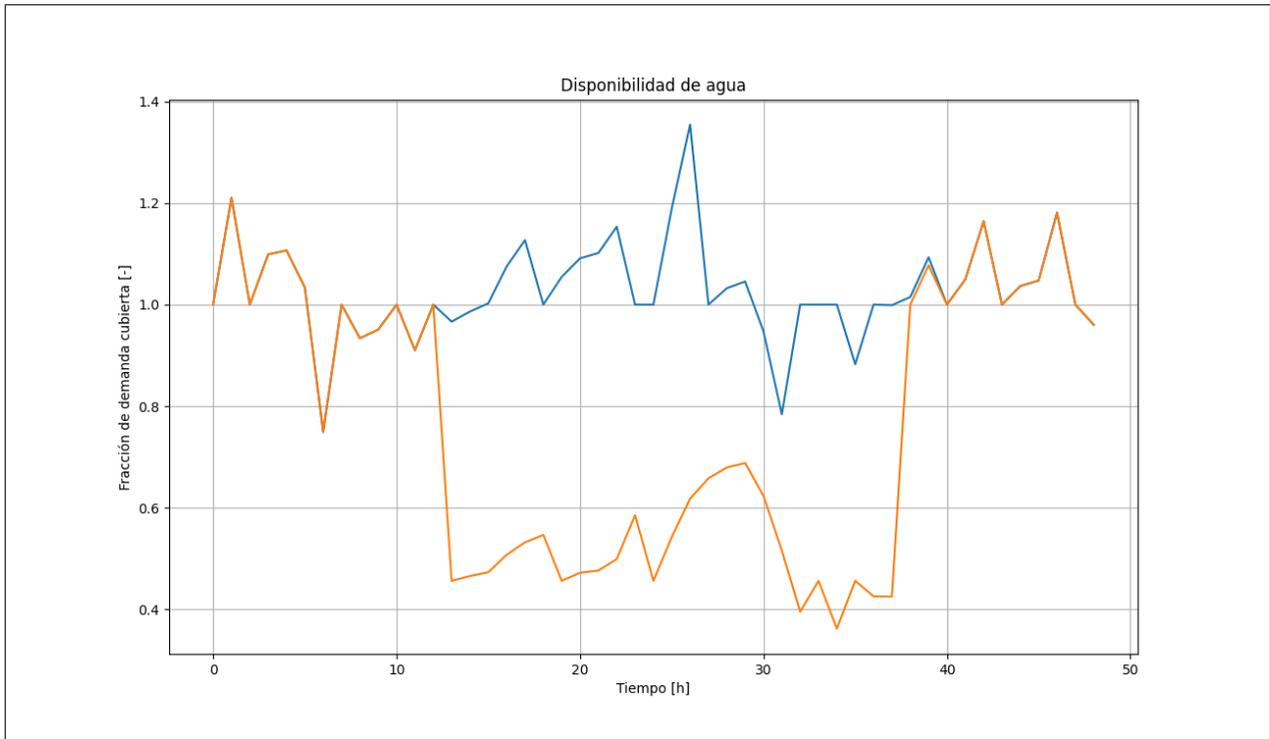


Figura 4.25. Variaciones en la disponibilidad del servicio de agua potable (anaranjado) en relación a la métrica basal (azul). Fuente: elaboración propia.

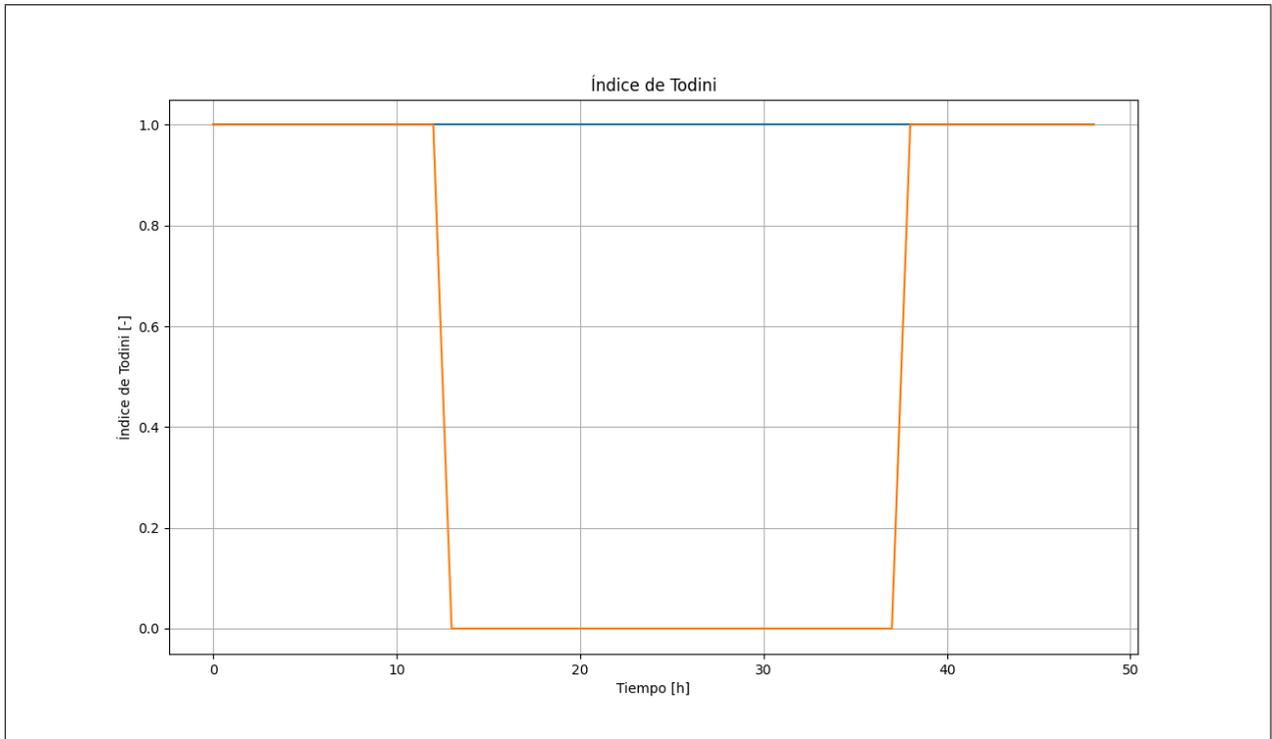


Figura 4.26. Variaciones en el índice de Todini (anaranjado) en relación a la métrica basal (azul). Fuente: elaboración propia.

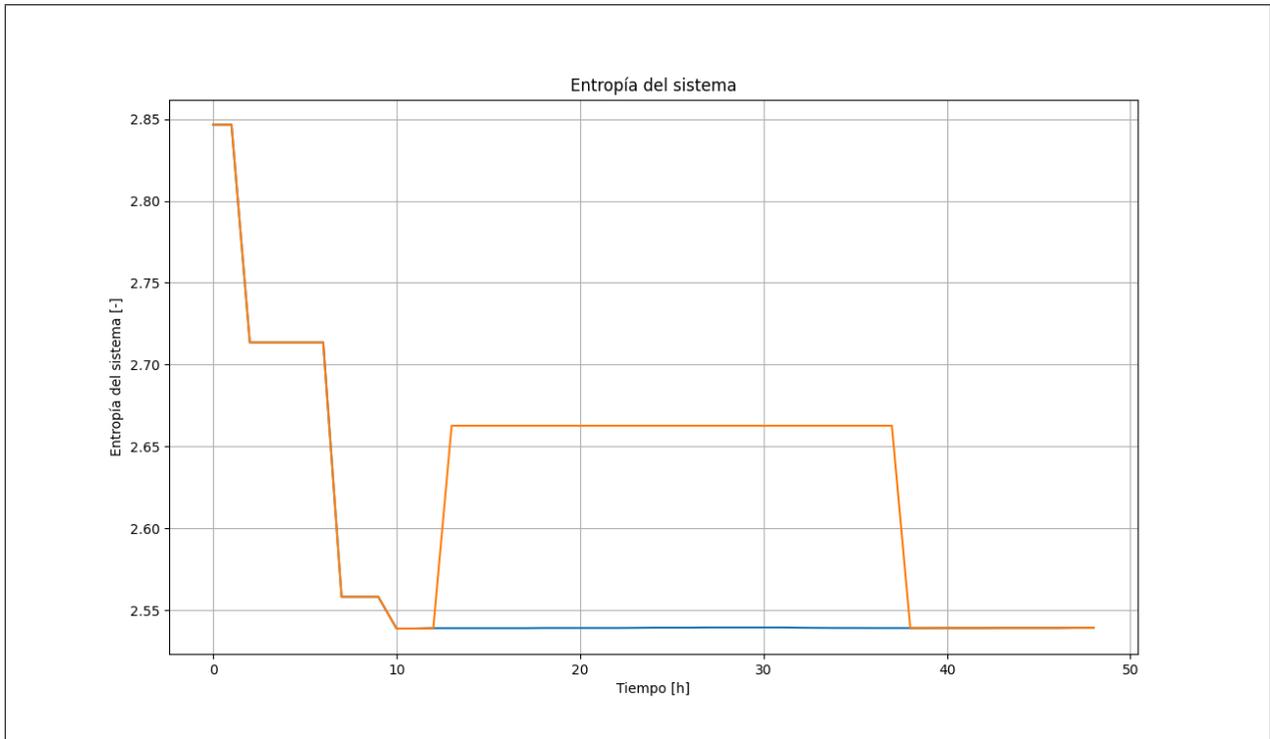


Figura 4.27. Variaciones de entropía (anaranjado) en relación a la métrica basal (azul). Fuente: elaboración propia.

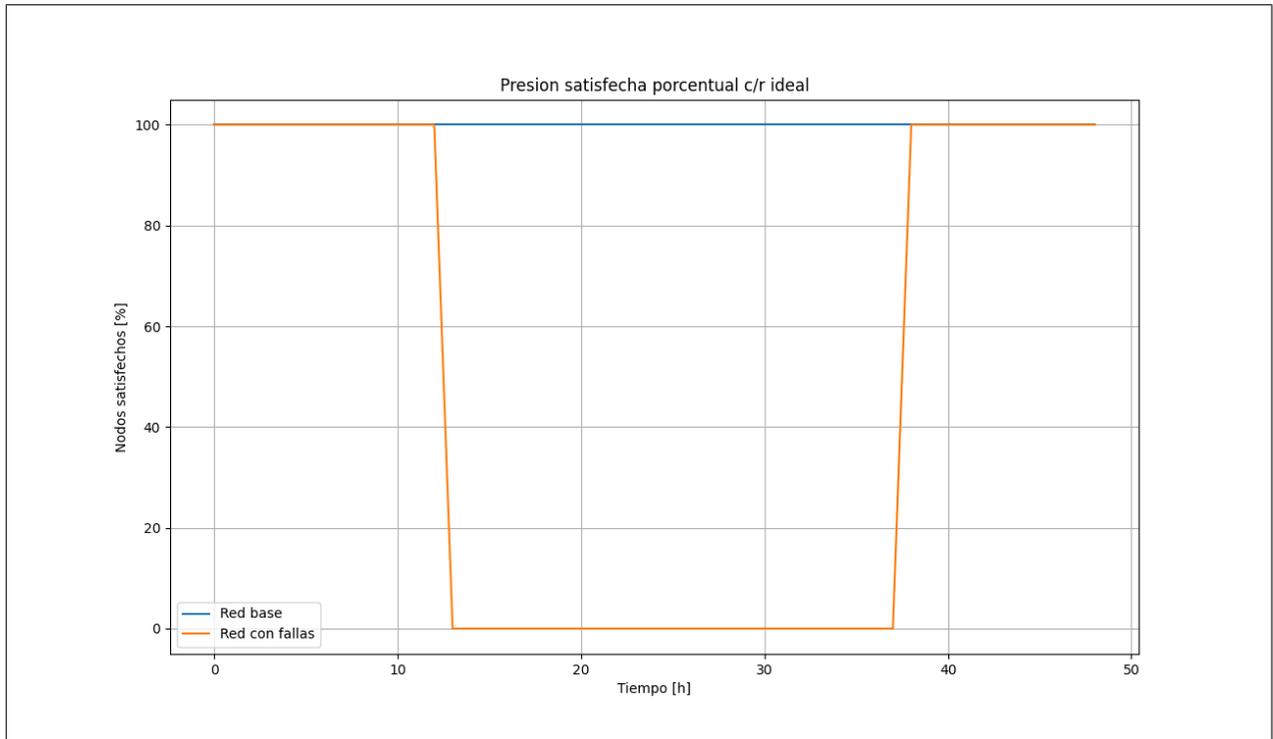


Figura 4.28. Variaciones de porcentaje de nodos satisfechos con la presión requerida (anaranjado) en relación a la métrica basal (azul). Fuente: elaboración propia.

5. RESULTADOS DE APLICACIÓN

5.1. Ránking de predictibilidad de falla por elemento

Empleando el muestreo de escenarios de falla y la estimación de probabilidad de falla condicionada a la falla de cada elemento, se realiza el ránking de predictibilidad de falla por elemento, que se representa en la figura 5.1

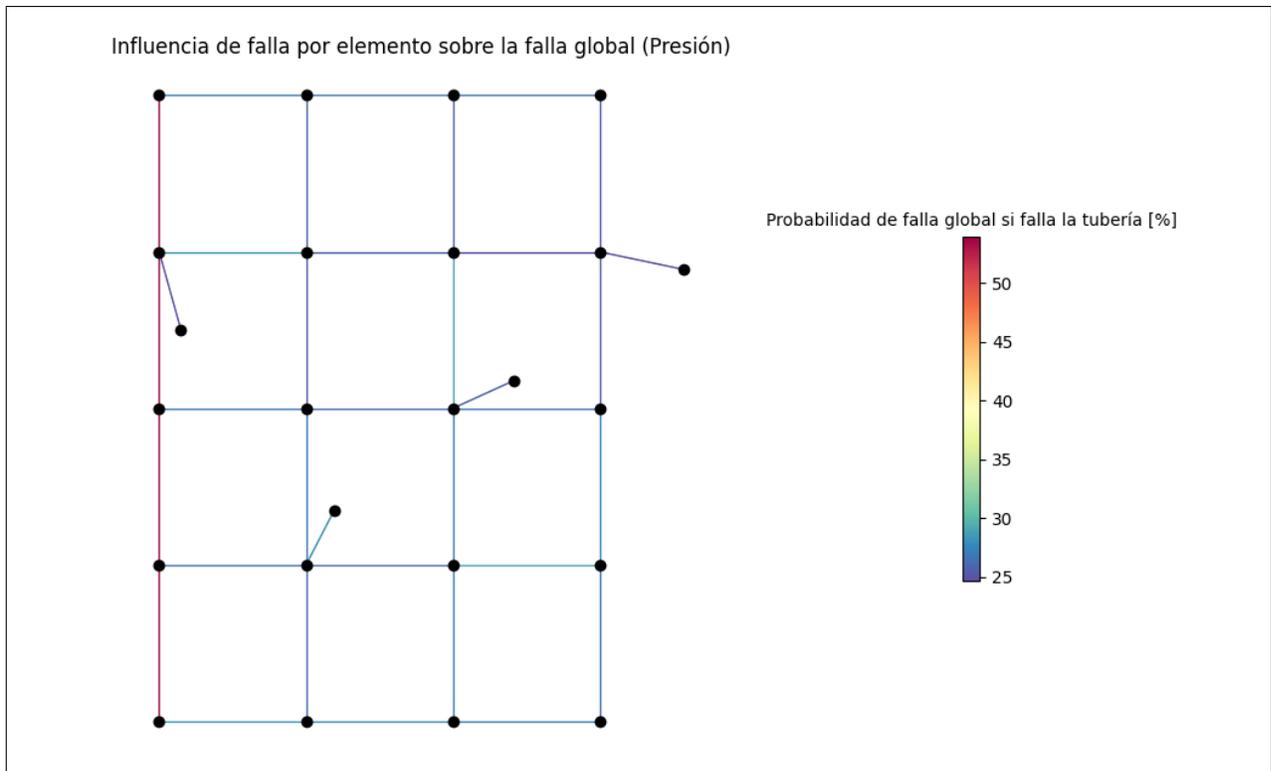


Figura 5.1. Probabilidad de falla de la red dado que el i -ésimo elemento falla.
Fuente: elaboración propia.

5.2. Ránking de predictibilidad de no falla por elemento

Similarmente, se realiza el muestreo de escenarios de no falla dado que un determinado elemento no falla. A partir de ello, se realiza el ránking de predictibilidad de no falla por cada elemento y se presenta en la figura 5.2

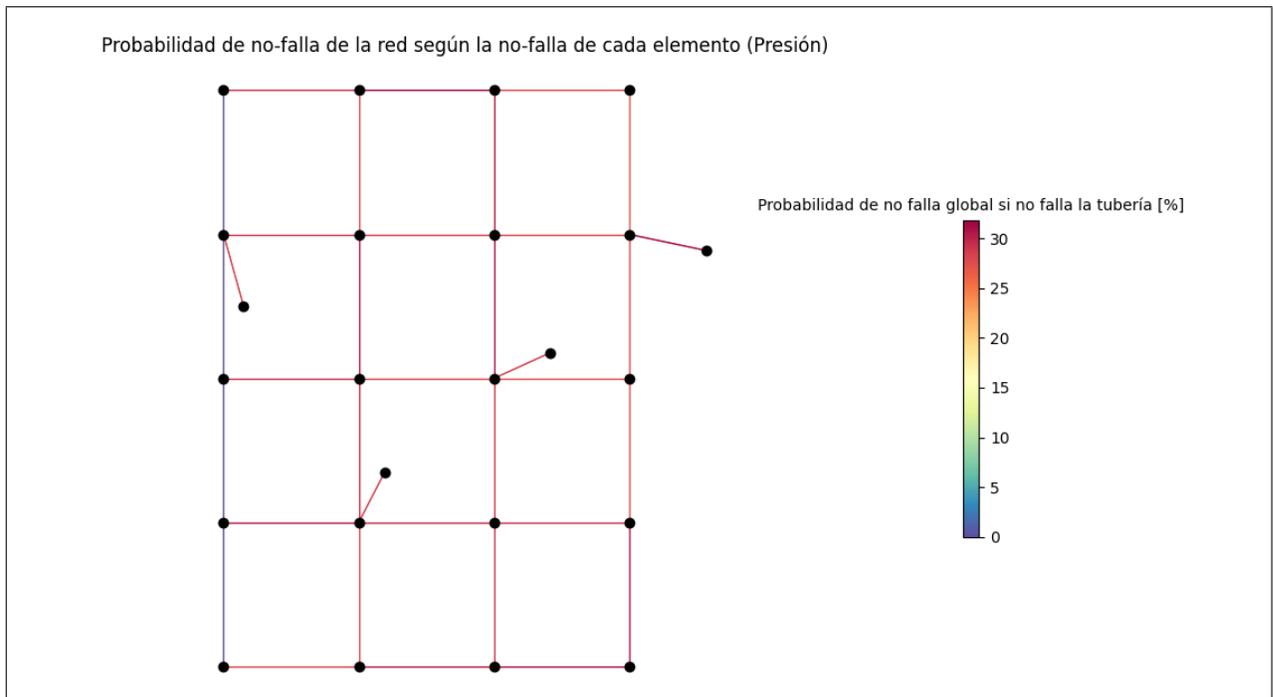


Figura 5.2. Probabilidad de no falla de la red dado que el i -ésimo elemento no falla.
Fuente: elaboración propia.

5.3. Métricas hidráulicas y reparación

En las figuras 5.3 a 5.7 se esquematizan los procesos de reparación de la red de prueba sometida a un impacto inicial multiamenaza a partir del estudio de la normalización del comportamiento de las métricas hidráulicas.

5.4. Resiliencia y herramientas de orden de criticidad

Se utiliza la ecuación 2.6 para calcular la resiliencia asociada a cada uno de los procesos de reparación orientados según diferentes métodos de priorización de reparación, y los resultados -una vez normalizados, para cada métrica hidráulica, con el objetivo de permitir una más fácil visualización- son presentados en la figura 5.8.

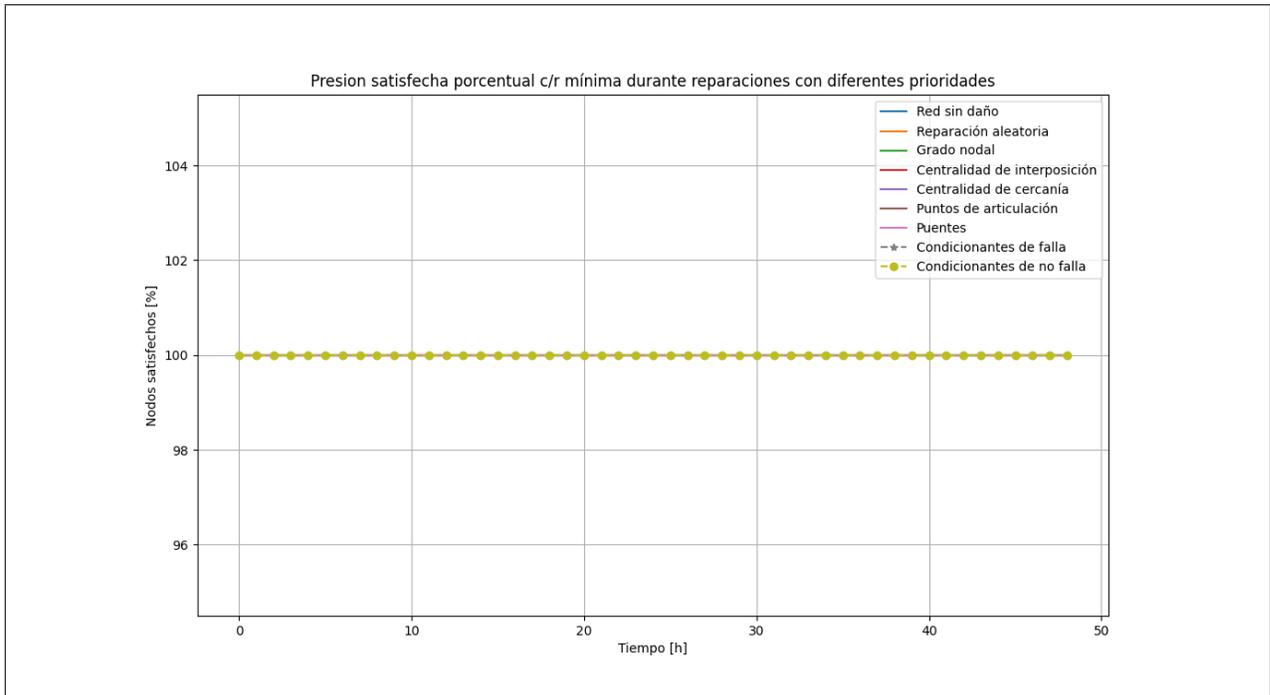


Figura 5.3. Comportamiento del porcentaje de nodos satisfechos con la presión mínima a través del proceso de reparación según diferentes métodos de priorización. Fuente: elaboración propia.

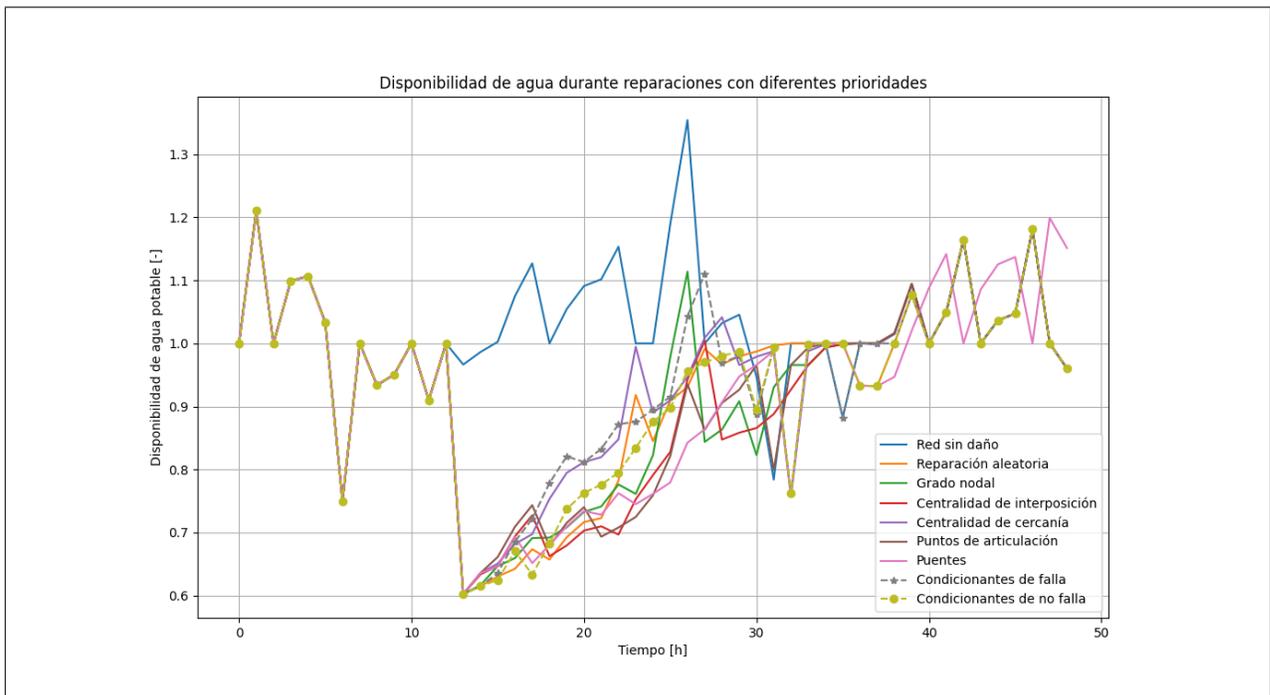


Figura 5.4. Comportamiento de la disponibilidad de servicio de agua potable (WSA) a través del proceso de reparación según diferentes métodos de priorización. Fuente: elaboración propia.

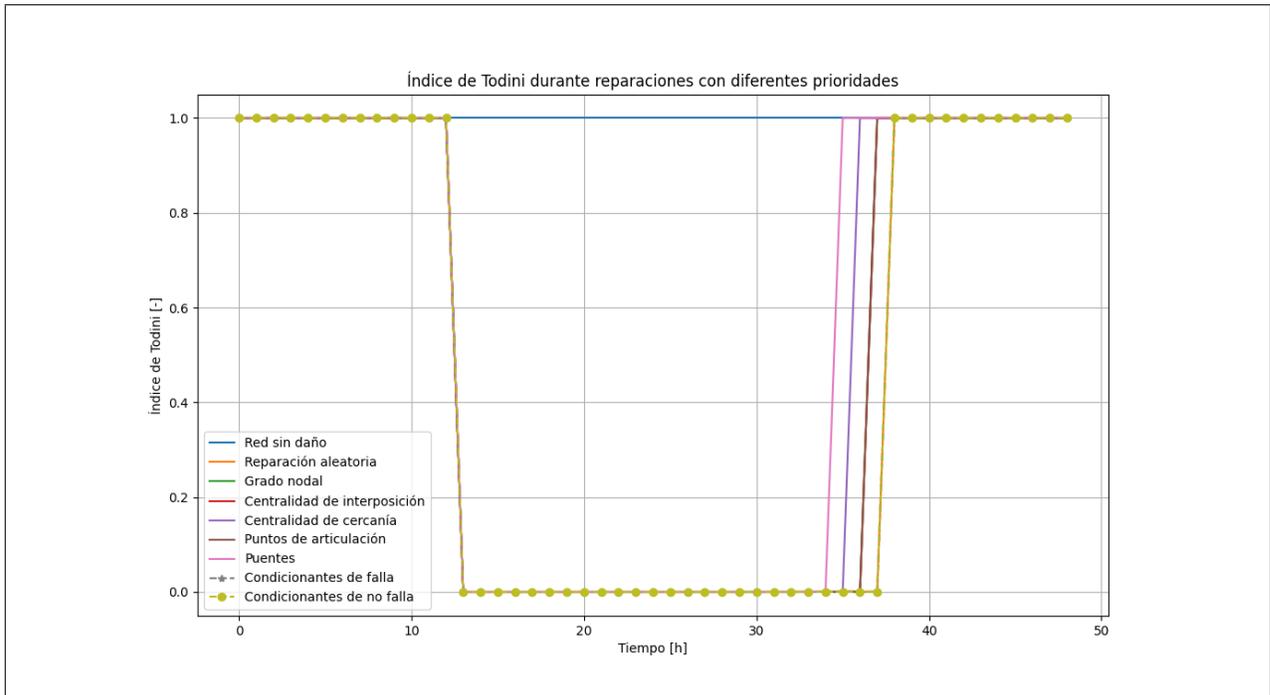


Figura 5.5. Comportamiento del índice de Todini a través del proceso de reparación según diferentes métodos de priorización. Fuente: elaboración propia.

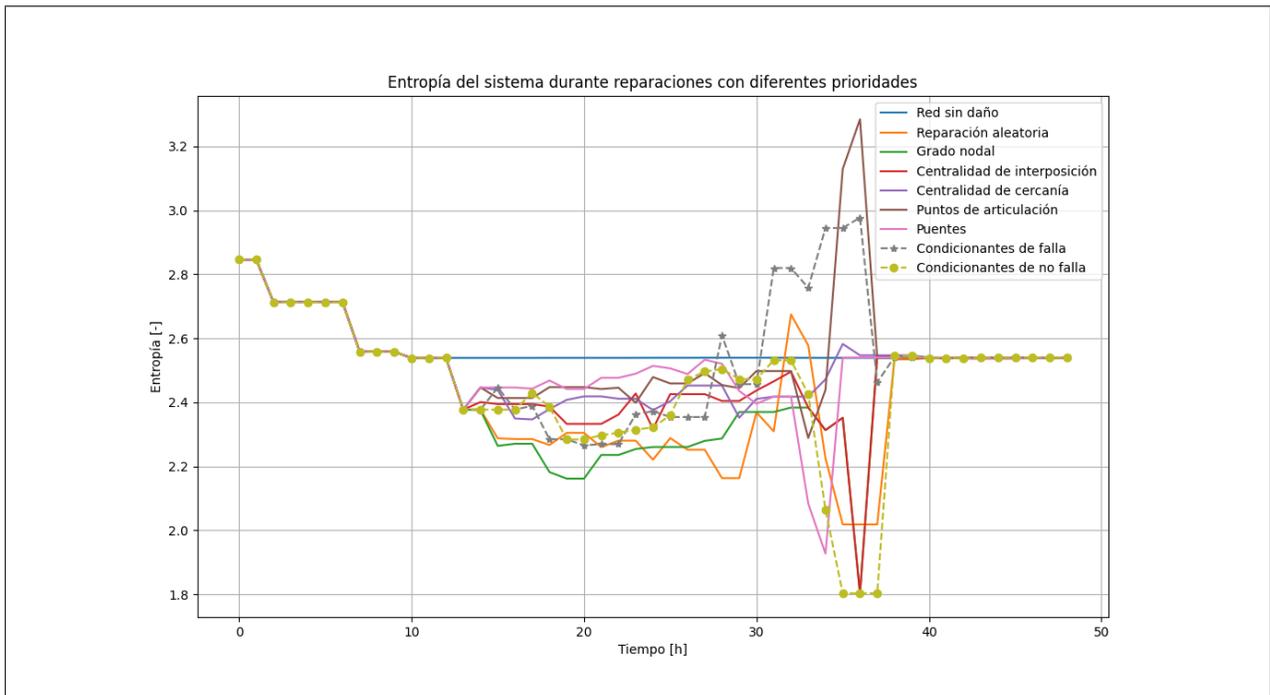


Figura 5.6. Comportamiento de la entropía a través del proceso de reparación según diferentes métodos de priorización. Fuente: elaboración propia.

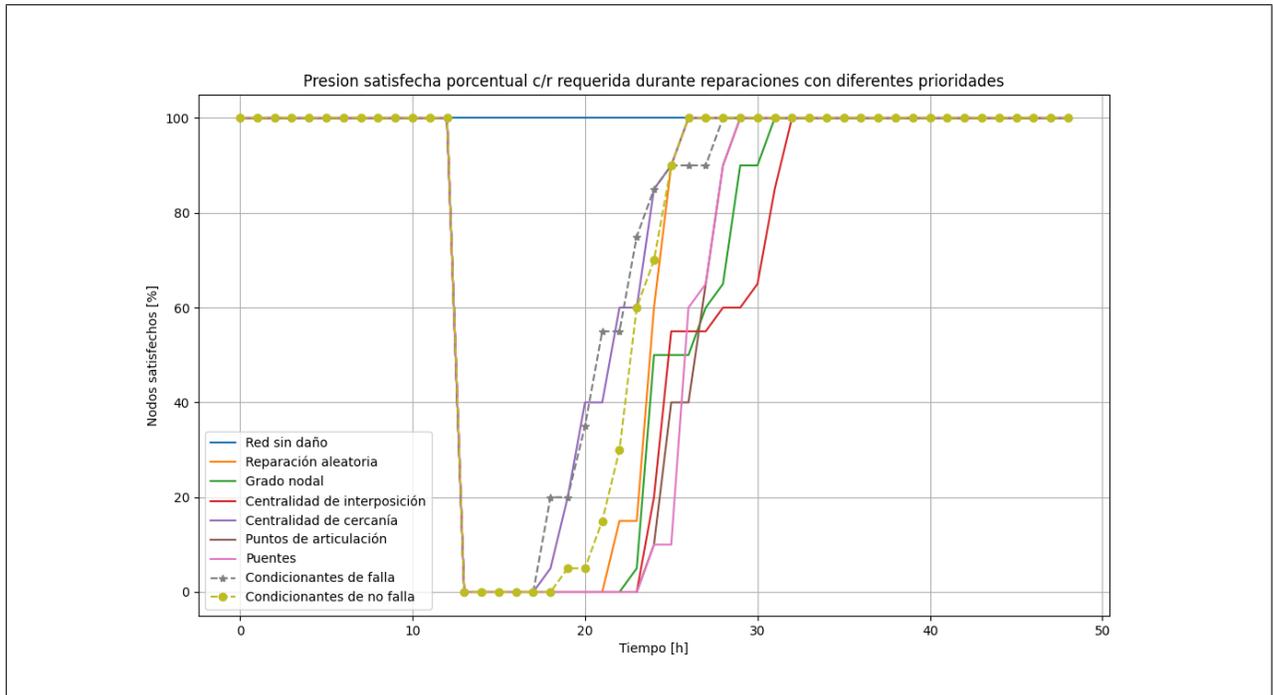


Figura 5.7. Comportamiento del porcentaje de nodos satisfechos con la presión requerida a través del proceso de reparación según diferentes métodos de priorización. Fuente: elaboración propia.

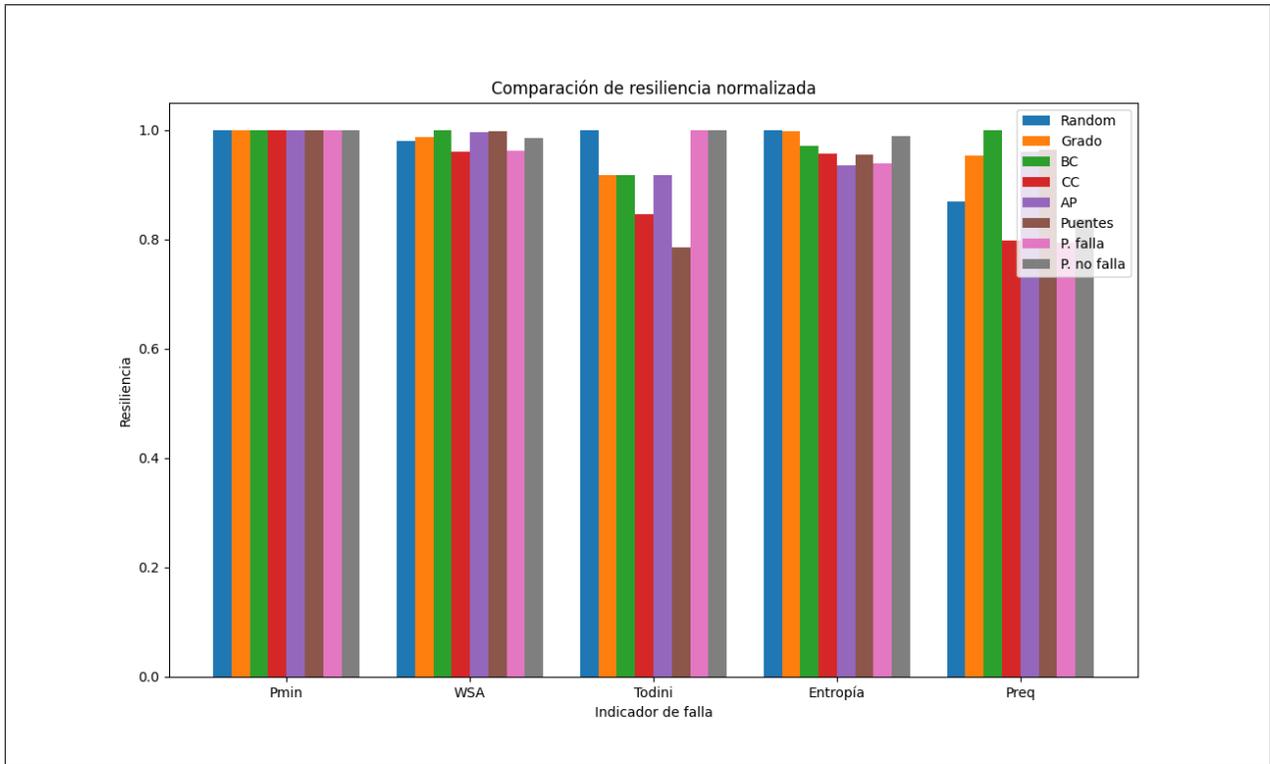


Figura 5.8. Resiliencia calculada para cada uno de los métodos de priorización de reparación de tuberías. Fuente: elaboración propia.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Rankings de predictibilidad

El ránking de predictibilidad de falla por elemento, presentado en la figura 5.1, se caracteriza por establecer que una falla en los elementos de la zona oeste tiene altas probabilidades de hacer fallar al sistema en términos de presión del servicio. Esta zona de la red es la de menor cota, como se observa en la figura 4.1. Se induce que una falla de algunos de estos elementos puede generar fugas lo suficientemente grandes como para que esta zona se comporte como un sumidero dentro de la red, generando pérdidas de presión imprevistas que llevan a la falla.

Por otro lado, el ránking de predictibilidad de no falla parece mostrar una correlación positiva con la cota de los nodos, observándose que una falla a mayor altura puede generar, con mayor certeza, una falla global.

¿Qué cambia, entonces, como para que la prioridad sea diferente? ¿Es esto una contradicción?

La mayor diferencia es que los métodos de caracterización de criticidad se enfocan en diferentes características de la red. El ránking de predictibilidad de falla establece como prioridad aquellos elementos que, al fallar, pueden llevar a la red a una falla general. Debido a ello, evitar que fallen constituye una medida de mitigación de riesgo. Por su parte, el segundo ránking corresponde a una medida de la robustez que aporta cada elemento a la red, por lo que evitar que dichos elementos fallen contribuye a aumentar la robustez general de la red.

La descripción de diferentes prioridades no es una contradicción, pues se puede considerar que el primer tipo de ránking está enfocado en optimizar la situación de resiliencia de redes sujetas a amenazas de alto riesgo, por lo que la mitigación es el mejor camino a seguir; mientras que las redes de bajo nivel de redundancia pueden mejorar su nivel de resiliencia al asegurarse de que la red puede absorber una mayor cantidad de daño en la medida que sus elementos críticos permanezcan operativos, aumentando la robustez.

Con este mismo concepto de adaptabilidad de las herramientas de identificación de elementos críticos, se considera pertinente realizar un análisis exhaustivo de riesgos en las redes sobre las cuales se planea utilizar el método, de manera que se prioricen las necesidades particulares de la red en cuestión.

6.2. Métricas de caracterización de redes

Las métricas de caracterización de las redes de distribución de agua potable muestran comportamientos sensibles a la composición o al comportamiento hidráulico que estas poseen.

Las métricas topológicas han mostrado requerir pocos recursos de obtención para una red pequeña, pero se espera que las métricas de centralidad, como la centralidad de interposición y la centralidad de cercanía tomen mucho más tiempo de cálculo y recursos para redes con más elementos, considerando que se deben emplear algoritmos de búsqueda de caminos geodésicos de conectividad entre cada par de nodos de la red.

Por otro lado, las métricas hidráulicas requieren un exigente proceso de modelamiento hidráulico, mientras que el cálculo de las métricas hidráulicas a partir de los resultados del modelo representan una pequeña fracción del tiempo empleado en la modelación.

6.2.1. Aspectos prácticos y metodológicos

En términos prácticos, el cálculo de las métricas topológicas requiere conocer una cantidad menor de información sobre la red, considerando exclusivamente la conformación y la conectividad entre sus elementos; mientras que el cálculo de métricas hidráulicas requiere el uso de estimaciones o mediciones del comportamiento de consumo de los usuarios del sistema –pues como se observa claramente en las figuras 4.10 y 4.11, las métricas dependen directamente de los patrones de consumo de los usuarios– y el conocimiento o estimación de las propiedades hidráulicas de las tuberías y conexiones.

Por otro lado, el cálculo de métricas topológicas requiere solo el uso de paquetes de abstracción y manipulación de redes a través de grafos; mientras que el cálculo de métricas hidráulicas requiere, además de lo anterior, un complejo sistema de módulos dedicados a representar el comportamiento dinámico de los flujos y las presiones al interior de las tuberías de la red; requiriendo desarrollar una larga y poco empinada curva de aprendizaje, que puede remitir esta posibilidad a la inviabilidad cuando existe poco tiempo para la implementación de las herramientas necesarias para el análisis de la red.

6.2.2. Elementos críticos como predictores de robustez

Se considera que el ranking realizado a partir de la probabilidad de no falla global de la red, en función de la probabilidad de un determinado elemento de no fallar, es una aplicación directa de la definición de robustez, y mantener dichos elementos en constante funcionamiento optimiza la robustez de la red. Se propone caracterizar la utilidad de este método en la mantención y planificación de reemplazos de tuberías, dado que la robustez posee su mayor beneficio durante el proceso de impacto.

6.2.3. Elementos críticos como predictores de resiliencia

Como se observa en la figura 5.8, existen diferentes grados de aporte a la resiliencia, de parte de cada método de búsqueda de elementos críticos, de acuerdo a la métrica hidráulica que se emplea en la estimación de la resiliencia. Si se considera que la entropía, a modo de ejemplo, es un reflejo de la redundancia en una red, entonces los métodos parecen equivalentes en términos de resiliencia y la variable de decisión no debe consistir en el cálculo de resiliencia durante un proceso de daño y reparación.

Sin embargo, también es posible notar que los métodos basados en centralidad no son especialmente óptimos si se busca mejorar el índice de Todini, asociado a la eficiencia energética de la red. Esto podría sugerir que la reparación de elementos céntricos en primer lugar, y los elementos

periféricos en segundo lugar, puede llevar a un efecto dinámico de flujos en que la energía no se aprovecha de forma óptima.

6.3. Análisis multiamenaza: limitaciones y cualidades del uso de metamodelos

El análisis multiamenaza basado en metamodelos requiere una gran cantidad de información empírica previa al desarrollo del presente método para su aplicación realista. Se requiere conocer exactamente el efecto que tiene un determinado evento de cierta magnitud, sobre un elemento cuyo estado de daño es conocido. Para ello, se recurre a la experimentación y se establecen las probabilidades que posee cada estado de daño frente a amenazas múltiples.

Sin embargo, el empleo de metamodelos para establecer las relaciones de interacción entre múltiples amenazas es versátil debido a que funciona a partir de un estado de daño y un segundo evento que impacta sobre el elemento dañado.

6.4. Distribuciones probabilísticas: limitaciones y posibles aplicaciones

El estudio probabilístico de las métricas hidráulicas nace a partir de la intención de establecer la certeza con que la variación de una métrica hidráulica puede predecir el estado de falla de una red. Esto puede permitir, en próximos trabajos de investigación, establecer relaciones lo suficientemente precisas como para poder detectar elementos con funciones reducidas con simples monitoreos puntuales de la red, de manera que no sea necesario verificar el correcto funcionamiento de los elementos de la red de distribución uno a uno ni esperar que, por coincidencia, una fuga sea perceptible.

Los resultados muestran que, para la cantidad de escenarios estudiados, la entropía y la disponibilidad del servicio de agua potable son modelables a través de distribuciones de probabilidad normal, como se aprecia en las figuras 4.20 y 4.22. Se cree que un estudio más refinado, con modelos de demanda y amenaza más realistas puede establecer métodos de caracterización probabilística de

las métricas hidráulicas restantes que, en el presente trabajo, no poseen el nivel de ajuste necesario para sugerir que la distribución probabilística es conocida.

7. CONCLUSIONES

Se determina que la identificación de la representatividad de métricas en el estado de una red dependen de las amenazas que se consideran en el estudio, del modelo multiamenaza implementado, de las curvas de fragilidad y de la capacidad de cómputo. La representatividad puede resultar muy alta para ciertas variables en relación al estado de falla, por lo que el modelo de cada una de ellas frente a múltiples magnitudes de amenaza parece ser esencial para la comprensión temprana del estado de falla cuando un escenario de deficiencia de una red se presenta, siendo innecesario incluir información sobre la manera en que la red está fallando, y pudiendo desarrollar inmediatamente planes de contingencia que se basen en la corrección del funcionamiento de los elementos críticos de dicha red frente a las amenazas previamente estudiadas.

El conocimiento del comportamiento de las métricas de la red frente a las amenazas naturales modeladas es vital para caracterizar las fallas de forma óptima sin emplear recursos excesivos en reconocimiento de fugas o de colapsos en escenarios catastróficos. Al conocer el escenario de desastre, se conocerá, como consecuencia, el comportamiento de las variables y, por tanto, los elementos que desempeñan un rol crítico, permitiendo orientar de forma eficiente los recursos de reparación y reemplazo; con el fin de restablecer los valores normales o aceptables de dicha variable.

En relación a la determinación de criticidad de los elementos de una red de distribución de agua potable, es importante destacar que las diferentes formas de priorización no son meras alternativas del mismo procedimiento pues, como se ha podido observar en las comparaciones de resiliencia, la métrica empleada como indicador de funcionalidad determina en gran medida el método que maximiza la resiliencia. Sin embargo, debido a que cada métrica hidráulica responde a una característica particular de la red, se ha de seleccionar la métrica hidráulica en función de los objetivos de preservación en la red de distribución de agua potable.

De acuerdo a lo anterior, las prioridades particulares del entorno social en que se enmarca el desarrollo del servicio de distribución de agua potable determinará la conveniencia o predilección

por diferentes métodos de priorización. Una red con bajos niveles de monitoización puede emplear elementos como el grado de los nodos para establecer las prioridades de reparación en eventos de catástrofe, mientras que una red con un nivel de redundancia bajo se debería centrar en la priorización según el índice de predictibilidad de falla, considerando que los elementos más susceptibles a generar la falla del sistema presentan altos niveles de estrés funcional.

Se espera que el método propuesto se emplee en las etapas de planificación, mantención y reparación de elementos en redes de distribución de agua potable de diferentes composiciones, con caracterizaciones realistas tanto de amenazas múltiples –y de los metamodelos asociados– como de patrones de demanda de agua potable, con el fin de aumentar la resiliencia de las redes a partir de las variables de decisión en los procesos de diseño.

BIBLIOGRAFÍA

- Anwar, G. A., Dong, Y., & Zhai, C. (2020). Performance-based probabilistic framework for seismic risk, resilience, and sustainability assessment of reinforced concrete structures. *Advances in Structural Engineering*, 23(7), 1454–1472.
- Awumah, K., Goulter, I., & Bhatt, S. (1990). Assessment of reliability in water distribution networks using entropy based measures. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 4(4), 309–320.
- Brzezinski, M. (2012). The chen–shapiro test for normality. *The Stata Journal*, 12(3), 368–374.
- Cheung, P., Van Zyl, J., & Reis, L. (2005). Extension of epanet for pressure driven demand modeling in water distribution system. *Computing and Control for the Water Industry*, 1, 311–316.
- Cocuñame Ricardo, D. A., & Salcedo Hurtado, E. d. J. (2017). Evaluación del riesgo de inundación ante tsunami local en la isla de cascajal, pacífico colombiano. *Revista de Geografía Norte Grande*(68), 185–219.
- Consejo Europeo. (2008). *Sobre la identificación y designación de infraestructuras críticas europeas y la evaluación de la necesidad de mejorar su protección*. Diario Oficial de la Unión Europea.
- Didier, M., Broccardo, M., Esposito, S., & Stojadinovic, B. (2018). A compositional demand/supply framework to quantify the resilience of civil infrastructure systems (re-codes). *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 3(2), 86–102.
- Durán, G. (2015). Agua y pobreza en santiago de chile: Morfología de la inequidad en la distribución del consumo domiciliario de agua potable. *EURE (Santiago)*, 41(124), 225–246.
- Freeman, L. C. (1977). A set of measures of centrality based on betweenness. *Sociometry*, 40(1), 35–41. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/3033543>
- Gardner, J., & Knopoff, L. (1974). Is the sequence of earthquakes in southern california, with aftershocks removed, poissonian? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64(5), 1363–1367.

- Garvs, I. M. (2020). Desarrollo de curvas de fragilidad para sistemas de distribución de agua en Chile. *Memoria para optar al título de ingeniero civil*.
- Horzella, B. (2019). Protección de infraestructura crítica y fuerzas armadas: Conceptualización y experiencia comparada.
- Javanbarg, M., Scawthorn, C., Kiyono, J., & Ono, Y. (2009). Multi-hazard reliability analysis of lifeline networks. In *Tclee 2009: Lifeline earthquake engineering in a multihazard environment* (pp. 1–8).
- Jayaram, N., & Srinivasan, K. (2008). Performance-based optimal design and rehabilitation of water distribution networks using life cycle costing. *Water Resources Research*, *44*(1).
- Kameshwar, S., & Padgett, J. E. (2014). Multi-hazard risk assessment of highway bridges subjected to earthquake and hurricane hazards. *Engineering Structures*, *78*, 154–166.
- Klise, K. A., Hart, D., Moriarty, D., Bynum, M. L., Murray, R., Burkhardt, J., & Haxton, T. (2017). Water network tool for resilience (wntr) user manual. *Oak Ridge, TN: Office of Scientific and Technical Information*. Retrieved from <https://wntr.readthedocs.io/en/stable/index.html>
- Knopoff, L., & Gardner, J. (1972). Higher seismic activity during local night on the raw worldwide earthquake catalogue. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, *28*(3), 311–313.
- Luen, B., & Stark, P. B. (2011). Are declustered earthquake catalogs poisson? *Geophys. J. Int*, *1*, 8.
- Martínez García, D., Lee, J., Keck, J., Kooy, J., Yang, P., & Wilfley, B. (2020). Pressure-based analysis of water main failures in California. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *146*(9), 05020016.
- Montes, M. T. A. (2017). Marco para la evaluación de políticas sobre la gobernanza de la resiliencia de la infraestructura crítica en América Latina.
- Núñez, I., Boroschek, R., Comte, D., & Contreras, V. (2014). Nuevo peligro sísmico para Chile. *Engineering Thesis*, 386.

- Ostfeld, A., Kogan, D., & Shamir, U. (2002). Reliability simulation of water distribution systems—single and multiquality. *Urban Water*, 4(1), 53–61.
- Paltán, H., Bassani, M., Minaya, V., & Rezzano, N. (2020). *Servicios de agua potable y saneamiento resilientes en américa latina y el caribe*. Washington, DC: VI-Series.
- Poulos, A., Monsalve, M., Zamora, N., & de la Llera, J. C. (2018). An updated recurrence model for chilean subduction seismicity and statistical validation of its poisson nature. *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- Reasenberg, P. (1985). Second-order moment of central california seismicity, 1969–1982. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B7), 5479–5495.
- Rokneddin, K., Ghosh, J., Dueñas-Osorio, L., & Padgett, J. E. (2013). Bridge retrofit prioritisation for ageing transportation networks subject to seismic hazards. *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(10), 1050–1066.
- Rossman, L. A., et al. (2000). Epanet 2: users manual.
- Todini, E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban water*, 2(2), 115–122.
- Wu, Z. Y., Wang, R. H., Walski, T. M., Yang, S. Y., Bowdler, D., & Baggett, C. C. (2008). Efficient pressure dependent demand model for large water distribution system analysis. In *Water distribution systems analysis symposium 2006* (pp. 1–15).
- Wu, Z. Y., Wang, R. H., Walski, T. M., Yang, S. Y., Bowdler, D., & Baggett, C. C. (2009). Extended global-gradient algorithm for pressure-dependent water distribution analysis. *Journal of water resources planning and management*, 135(1), 13–22.
- Yazdani, A., Otoo, R. A., & Jeffrey, P. (2011). Resilience enhancing expansion strategies for water distribution systems: A network theory approach. *Environmental Modelling & Software*, 26(12), 1574–1582.