



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

**ESTIMACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE REDES DE AGUA POTABLE A
TRAVÉS DE UNA PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DE LA
SENSORIZACIÓN**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JOSÉ ESTEBAN URETA PARRAGUEZ

PROFESORA GUÍA:
YOLANDA ALBERTO HERNÁNDEZ

MIEMBROS DE LA COMISION:
YARKO NIÑO CAMPOS
GERMÁN FERNÁNDEZ FUENZALIDA

SANTIAGO DE CHILE
2022

ESTIMACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE REDES DE AGUA POTABLE A TRAVÉS DE UNA PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DE LA SENSORIZACIÓN

Dada la creciente demanda de agua potable y la escasez del recurso hídrico es cada vez más importante optimizar el uso de agua y evitar las pérdidas de ésta. Por ello, el Centro Avanzado para Tecnologías del Agua, CAPTA, con su proyecto “Riesgo de pérdidas en agua potable”, RiPRA, busca estudiar las pérdidas de agua potable, principalmente debido a fugas, que se puedan producir por deterioro de sus elementos, efectos de amenazas naturales u operacionales. Este trabajo tiene como objetivo principal generar un *software* capaz de estimar la confiabilidad de redes de distribución de agua potable y propone una configuración optimizada de sensorización para las mismas. Para contribuir con este objetivo, se propone estudiar la confiabilidad de las redes de distribución de agua potable a través de su criticidad, en términos de métricas topológicas, hidráulicas y mixtas, y su resiliencia frente a amenazas sísmicas a través de diversos planes de reparación. También se considera la implementación de una metodología de optimización de la sensorización en redes de distribución de agua en dos etapas: la optimización de la localización de sensores de presión a través de un algoritmo genético, y la optimización de la cantidad de sensores a través de un análisis costo-beneficio. El algoritmo resultante se prueba con redes modelo, denominadas *toy networks*, pero está diseñado para analizar cualquier red. Los resultados de las pruebas de confiabilidad y resiliencia son poco concluyentes, ya que la recuperación del sistema luego de una amenaza sísmica muestra ser indiferente del orden de reparación de los elementos. Se atribuye que este comportamiento se puede deber a las características de las *toy networks* empleadas, principalmente, a su forma de rejilla que ofrece varias rutas alternativas para el flujo, amortiguándose el impacto de las fugas. Por lo anterior, se propone que la implementación de nuevas métricas de criticidad que consideren la sensibilidad al daño y su aplicación a redes con morfología más compleja. Por su parte, la optimización de la sensorización resulta ser muy eficiente para redes pequeñas, pero su escalabilidad a redes reales resulta poco viable debido a su tiempo de computo exponencial respecto al tamaño de la red, por lo que se debe explorar en nuevas metodologías que permitan reducir el número de iteraciones y/o la cantidad de ubicaciones candidatas a ser sensorizadas.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Contenidos del informe	2
2. Marco Teórico	3
2.1. Conceptos fundamentales	3
2.1.1. Elementos de una red de distribución de agua potable	3
2.1.2. Conceptos topológicos	3
2.1.3. Métricas hidráulicas	4
2.1.4. Infraestructura crítica y amenazas	5
2.2. Confiabilidad y resiliencia	5
2.3. Criticidad	8
2.4. Optimización de la sensorización	9
2.4.1. Algoritmos genéticos	10
2.4.2. Cobertura	11
3. Metodología	14
3.1. Modelación hidráulica de la red	14
3.2. Confiabilidad de la red	16
3.2.1. Criticidad	17
3.2.1.1. Importancia funcional	18
3.2.1.2. Importancia estructural	18
3.2.1.3. Importancia promedio	19
3.2.2. Escenarios de daño	20
3.2.3. Orden de reparación	22
3.2.4. Resiliencia y rapidez	22
3.3. Optimización de la sensorización	24
3.3.1. Escenarios de falla	25
3.3.2. Matriz de presiones	26
3.3.3. Presión umbral	26
3.3.4. Algoritmo genético	27
3.3.5. Análisis costo-beneficio	28
3.3.6. Aplicación de la metodología	29
4. Resultados y discusiones	30
4.1. Criticidad y resiliencia de la red	30
4.1.1. Importancia estructural, funcional y promedio	30
4.1.2. Amenaza y reparación	33

4.1.3. Resiliencia y rapidez	37
4.2. Sensorización	41
4.2.1. Presión umbral y cobertura	41
4.2.2. Tiempos de cómputo	45
4.2.3. Optimización de la sensorización	47
5. Conclusiones	50
Bibliografía	53
ANEXOS	55
Anexo A. Resultados adicionales	56
A.1. Resultados confiabilidad “Red20”	56
A.2. Resultados sensorización “Red20”	63

Índice de Tablas

3.1.	Descripción redes	16
3.2.	Parámetros curvas de fragilidad	20
4.1.	Tiempos de recuperación “Red48”	38
4.2.	Matriz de restos de presiones Red20, escenarios 1-10.	42
4.3.	Matriz de restos de presiones Red20, escenarios 11-20.	43
4.4.	Matriz de detección Red20	45
4.5.	Tiempos de cómputo	47

Índice de Ilustraciones

2.1.	Tasa de falla de una tubería	7
2.2.	Diagrama de propagación del daño	8
2.3.	Esquema algoritmo genético	11
3.1.	Respuesta del caudal a la pérdida de presión	14
3.2.	Red20	15
3.3.	Red48	15
3.4.	Red96	16
3.5.	Red192	16
3.6.	Diagrama de metodología para la evaluación de la resiliencia	17
3.7.	Curvas de fragilidad para tuberías de asbesto-cemento	21
3.8.	Diagrama del cálculo de resiliencia	23
3.9.	Diagrama de metodología de optimización de la sensorización	25
3.10.	Ejemplo de cruce	28
4.1.	Importancia estructural “Red48”	30
4.2.	Importancia funcional media “Red48”	31
4.3.	Importancia funcional en demanda máxima “Red48”	31
4.4.	Importancia promedio media “Red48”	32
4.5.	Importancia promedio en demanda máxima “Red48”	32
4.6.	Disponibilidad del servicio de agua potable “Red48”	33
4.7.	Factor de cumplimiento de la presión requerida “Red48”	34
4.8.	Factor de cumplimiento de la presión mínima “Red48”	35
4.9.	Índice de Todini “Red48”	36
4.10.	Entropía de la red “Red48”	37
4.11.	Resumen análisis de resiliencia normalizada “Red48”	39
4.12.	Resumen análisis de resiliencia normalizada “Red20”	39
4.13.	Resumen análisis de resiliencia relativa “Red48”	40
4.14.	Resumen análisis de resiliencia relativa “Red20”	41
4.15.	Cobertura total máxima respecto al umbral de presión	44
4.16.	Redes de prueba tiempo de cómputo	46
4.17.	Resultados algoritmo genético	48
4.18.	Resultados costo-beneficio	48
4.19.	Configuración óptima	49
A.1.	Importancia estructural “Red20”	56
A.2.	Importancia funcional media “Red20”	57
A.3.	Importancia funcional en demanda máxima “Red20”	57
A.4.	Importancia promedio media “Red20”	58
A.5.	Importancia promedio en demanda máxima “Red20”	58
A.6.	Disponibilidad del servicio de agua potable “Red20”	59

A.7.	Factor de cumplimiento de la presión requerida “Red20”	60
A.8.	Factor de cumplimiento de la presión mínima “Red20”	61
A.9.	Índice de Todini “Red20”	62
A.10.	Entropía de la red “Red20”	63
A.11.	Localización óptima de 3 sensores	64
A.12.	Localización óptima de 4 sensores	64
A.13.	Localización óptima de 5 sensores	65
A.14.	Localización óptima de 6 sensores	65
A.15.	Localización óptima de 7 sensores	66
A.16.	Localización óptima de 8 sensores	66
A.17.	Localización óptima de 9 sensores	67
A.18.	Localización óptima de 10 sensores	67
A.19.	Localización óptima de 11 sensores	68
A.20.	Localización óptima de 12 sensores	68
A.21.	Localización óptima de 13 sensores	69
A.22.	Localización óptima de 14 sensores	69

Capítulo 1

Introducción

La tasa de urbanización global ha aumentado desde 37% en 1970 a 54% en 2016 y se proyecta que llegue al 67,2% para el año 2050 (Wang, Zheng, Li, y Shen, 2019), lo que se traduce en una mayor demanda de agua potable. Las redes de distribución agua potable son infraestructuras vitales para la población y la industria, por lo que, deben ser seguras y confiables incluso cuando son afectadas por peligros provocados por el hombre o amenazas naturales como sismos, tsunamis e inundaciones.

Según la Superintendencia de Servicios Sanitarios (2019), hay un 32,9% del agua potable producida a nivel nacional que se considera como no facturada. Estas aguas se pueden dividir en tres categorías:

- Consumo no facturado: principalmente el agua usada por la misma empresa sanitaria para limpieza de la red o lavado de estanques y agua usada en extinción de incendios.
- Pérdidas aparentes: corresponden al agua consumida pero que no es contabilizada, principalmente por conexiones clandestinas, errores de medición en los medidores y uso fraudulento de medidores.
- Pérdidas físicas: agua no consumida por fallas en el sistema de distribución.

En este contexto, el Centro Avanzado para Tecnologías del Agua (CAPTA) desarrolla el proyecto Riesgo de pérdidas en redes de agua potable, RiPRA, en el que se inserta este trabajo. RiPRA busca desarrollar un sistema que permita analizar el riesgo de pérdidas físicas de agua potable y la resiliencia del sistema, debido a amenazas naturales, operacionales y al deterioro de los elementos. La detección, predicción y cuantificación de las pérdidas físicas permitiría desarrollar planes de reparación, mantención y protección, lo que se traduce en un servicio que recibe menos daño al ser impactado por una amenaza y recupera de mejor forma su funcionalidad tras recibir daño.

En esta memoria se evalúa el desempeño de planes de reparación basados en la criticidad de los elementos, ampliando el trabajo de Fernández (2021), aplicando la metodología a más redes, con mayor variedad de eventos sísmicos e integrando más métricas de criticidad. Adicionalmente, con el fin de contribuir en la oportuna y eficiente detección de fugas, se desarrolla una metodología para la optimización de la cantidad y localización de sensores.

Este trabajo de memoria se dividirá en tres ejes temáticos aplicados a redes de distribución de agua potable: criticidad, optimización de la sensorización y estimación de la confiabilidad. Cada una de las metodologías resultantes se aplicará, como caso de estudio, a una o varias *toy networks*, las cuales son redes de agua potable artificiales diseñadas para este estudio.

1.1. Objetivos

Objetivo general:

Estimar la confiabilidad de las redes de agua potable afectadas por amenazas naturales con base en una sensorización mínima.

Objetivos específicos:

- Implementar en *Python* métricas de criticidad para redes de agua potable.
- Evaluar la resiliencia de una red de agua potable modelo, *Toy network*, frente a un evento sísmico respecto a diferentes ordenes de reparación derivados de sus métricas de criticidad.
- Implementar en *Python* un modelo de optimización de la cantidad y localización de la sensores en redes de agua potable modelo, *toy networks*.

1.2. Contenidos del informe

La estructura de esta memoria se compone de 5 capítulos. Estos capítulos, en su mayoría, están divididos en dos ejes fundamentales: criticidad y resiliencia, y optimización de la sensorización.

- Introducción: describe la motivación, objetivos y estructura de la memoria.
- Marco Teórico: en este capítulo se presentan los conceptos clave de la investigación, como son la confiabilidad, y la cobertura; se describe y discute sobre estudios y publicaciones relacionadas con la confiabilidad y métricas de criticidad, además de los parámetros, funciones objetivo y métodos de optimización para la selección de la localización y cantidad de sensores.
- Metodología: se definen las redes modelo a utilizar, el entorno de modelación y sus parámetros. Se definen las metodologías para la confiabilidad y optimización de sensorización, explicitando las métricas a evaluar, los modelos de falla asociados y las variables de entrada y salida.
- Resultados: se presentan y analizan los resultados de las metodologías antes descritas aplicadas a diferentes *toy networks*.
- Conclusión: integra las conclusiones de la implementación, ejecución y resultados de las metodologías seleccionadas, además de un análisis crítico de las métricas calculadas y el modelo.

:

Capítulo 2

Marco Teórico

En el presente capítulo se definen los conceptos fundamentales para cada uno de los ejes de trabajo, incluyendo la revisión de diversas metodologías y estudios previos acerca del tema de estudio.

2.1. Conceptos fundamentales

2.1.1. Elementos de una red de distribución de agua potable

El concepto de red de distribución de agua potable, se refiere al conjunto de elementos que permiten que el agua potable se transporte desde una fuente a su punto de uso. Los elementos de una red de distribución de agua potable son los siguientes:

- Tuberías: tubos, generalmente de forma cilíndrica, por el cual fluyen los fluidos.
- Reservorio: es una piscina o lago artificial de gran tamaño que almacena agua potable. La cantidad de líquido que almacenan es tan grande que su altura se considera constante.
- Estanque: es un recipiente que almacena agua potable. Su altura de agua es variable.
- Válvula: elemento de control de flujo.
- Uniones: también denominadas conexiones, sirven para unir los elementos antes enunciados.

2.1.2. Conceptos topológicos

La criticidad de los elementos está, en parte, a su topología por lo que es necesario definir los siguientes conceptos:

- Grafo: red de elementos conectados entre si. Se compone de vértices y arcos (Wilson, 1996).
- Vértice: también denominados nodos, corresponden a los puntos de inicio y final de un arco (Wilson, 1996). En el grafo de una red distribución de agua potable, los nodos representan válvulas, reservorios, estanques y conexiones.

- Arco: unión entre nodos (Wilson, 1996). En una grafo de red de distribución de agua potable representa a las tuberías.
- Grafo dirigido: es un grafo donde los arcos van de un nodo a otro unidireccionalmente. En este caso. los arcos se representan con flechas (Wilson, 1996).
- Rutas: conjunto de arcos que llevan de un nodo a otro (Wilson, 1996).
- Ruta geodésica: es la ruta que recorre menor distancia de un nodo a otro.
- Red bayesiana: es un grafo dirigido, donde cada nodo tiene una probabilidad asociada (Lee et al., 2020).

2.1.3. Métricas hidráulicas

A partir del modelo hidráulico, se extraen ciertas métricas que permiten conocer el desempeño de la red y sus elementos. Entre ellas se encuentran:

- Demanda: caudal suministrado por un nodo.
- Demanda: esperada: caudal que suministraría el nodo en condiciones normales de la red. Este se estima con los patrones de demanda de los clientes. Es una variable de entrada del modelo hidráulico.
- Presión: Los modelos requieren que se establezcan valores de presión mínima y requerida. Al igual que la demanda, ésta se mide en cada nodo de la red, para cada instante de tiempo.
- Índice de Todini: métrica de la confiabilidad del sistema relacionada con la energía disipada para satisfacer la presión y demanda del sistema (Todini, 2000).

$$I = 1 - \frac{P_{int}^*}{P_{max}^*} \quad (2.1)$$

Con,

I : índice de Todini, [-].

P_{int}^* : potencia disipada en la red, [W].

P_{max}^* : potencia máxima que sería disipada para satisfacer las demandas de caudal y presión de la red, [W].

- Entropía: la entropía de un nodo relaciona el caudal que pasa por él con el caudal de las tuberías que lo alimentan. La entropía del sistema es una suma ponderada de las entropías nodales; a mayor entropía tiene un sistema, mayor redundancia posee y, por lo tanto, mayor confiabilidad (Awumah et al., 1990).

$$S_j = - \sum_{i \in U_j} \frac{q_{ij}}{Q_j} \ln \frac{q_{ij}}{Q_j} \quad (2.2)$$

Con,

S_j : entropía del nodo j . [-].

q_{ij} : caudal desde el nodo i al nodo j , [m^3/s].

Q_j : caudal total en el nodo j , [m^3/s].

U_j : conjunto de nodos inmediatamente aguas arriba del nodo j .

$$\hat{S} = \sum_{j=1}^N \left[\frac{Q_j}{Q_0} S_j \right] - \sum_{j=1}^N \left[\frac{Q_j}{Q_0} \ln \frac{Q_j}{Q_0} \right] \quad (2.3)$$

Con,

\hat{S} : entropía de la red, [-].

Q_0 : suma de los caudales de las tuberías de la red, [m^3/s].

2.1.4. Infraestructura crítica y amenazas

Infraestructura crítica es cualquier sistema, red, instalación o elemento del que la sociedad depende para mantener la seguridad, la economía, el transporte y la salud pública. Ejemplos de infraestructura crítica, son: los hospitales, recintos policiales, estaciones de bomberos, redes de energía eléctrica y redes de distribución de agua potable.

Una falla en una estructura crítica, se refiere a una disminución de la funcionalidad con respecto al funcionamiento esperado de esta. En el caso de una red de distribución de agua potable, una falla se puede referir a una demanda o presión menor a la esperada en condiciones normales. Estas fallas se producen por eventos físicos, que pueden ser de origen natural, como un sismo, inundación o derrumbe; o derivado de la acción humana. A estos eventos físicos se les denomina amenaza.

El daño o pérdida de funcionalidad que genera una amenaza se puede estimar a través de la curva de fragilidad del sistema o elementos, ya que esta relaciona la probabilidad de que ocurra un estado de daño y la magnitud de la amenaza. Ligado a esto, se encuentra el concepto de riesgo, que es la ponderación de la probabilidad de que una amenaza ocurra con los daños que genera (ISO 31000, 2018).

2.2. Confiabilidad y resiliencia

La confiabilidad es una medida del desempeño o capacidad de una red de agua potable para satisfacer la demanda en cantidad y calidad en todas circunstancias (Gheisi y Naser,

2014). Mientras que la resiliencia es la capacidad de un sistema de recuperarse y sobrellevar la adversidad. Por lo tanto, un sistema que tiene mayor resiliencia es un sistema más confiable.

Según Anwar et al. (2019), la resiliencia está asociada a 4 atributos:

- Robustez: la habilidad para resistir el impacto de un evento extremo sin fallar completamente.
- Rapidez: la habilidad de recuperarse de un evento extremo de forma eficiente y efectiva.
- Redundancia: la existencia de componentes estructurales o sistemas sustitutos. En el caso de redes de distribución se refiere a la existencia de múltiples rutas para la satisfacción de la demanda y de múltiples fuentes para la misma,
- Inventiva: se refiere a la eficiencia en identificar problemas, priorización de soluciones y puesta en marcha de las soluciones.

Una red de agua potable puede fallar de manera mecánica, hidráulica o en la calidad del agua. Las fallas de tipo mecánicas/físicas se refieren a la desconexiones o daño en las tuberías. Son generalmente causadas por amenazas naturales, presiones internas o externas inesperadas, eventos climáticos extremos, permeación, corrosión o congelamiento. Las fallas hidráulicas ocurren cuando la demanda o presión en algún punto de la red es menor al esperado o requerido; las principales causas son: variación anormal y repentina de la demanda, flujo para extinción de incendios, cambios en la rugosidad de la tubería, tuberculación y fallas mecánicas. Las fallas en la calidad del agua son producidas principalmente por el crecimiento de biopelículas, corrosión interna, intrusión de contaminantes, nitrificación, formación y disolución de sarro y otras reacciones químicas producidas en la distribución (Gheisi et al., 2016). Un tipo de falla hidro-mecánica, son las fugas, que para efectos de este texto se define como el escape de agua potable por una fisura o agujero en cualquiera de los elementos de la red de distribución.

Para las fallas mecánicas, varios estudios sugieren que la tasa de falla de una tubería sigue la distribución ilustrada en la Figura 2.1, es decir, presentando una alta tasa de fallas al comienzo de su funcionamiento. Luego, en su edad intermedia, presentan una tasa de falla baja y constante. Finalmente, se presenta una tercera fase donde, producto del desgaste, la probabilidad de falla aumenta considerablemente con el tiempo (Gheisi et al., 2016). Singh y Adachi (2013) estudiaron el comportamiento de las fallas en el tiempo en tuberías de distintos materiales y concluyeron que el hierro fundido, el hierro dúctil, el asbesto y el PVC se comportan acorde a la distribución de la Figura 2.1. De los resultados también se destaca, la casi nula tasa de falla de las tuberías de PVC en la fase intermedia.

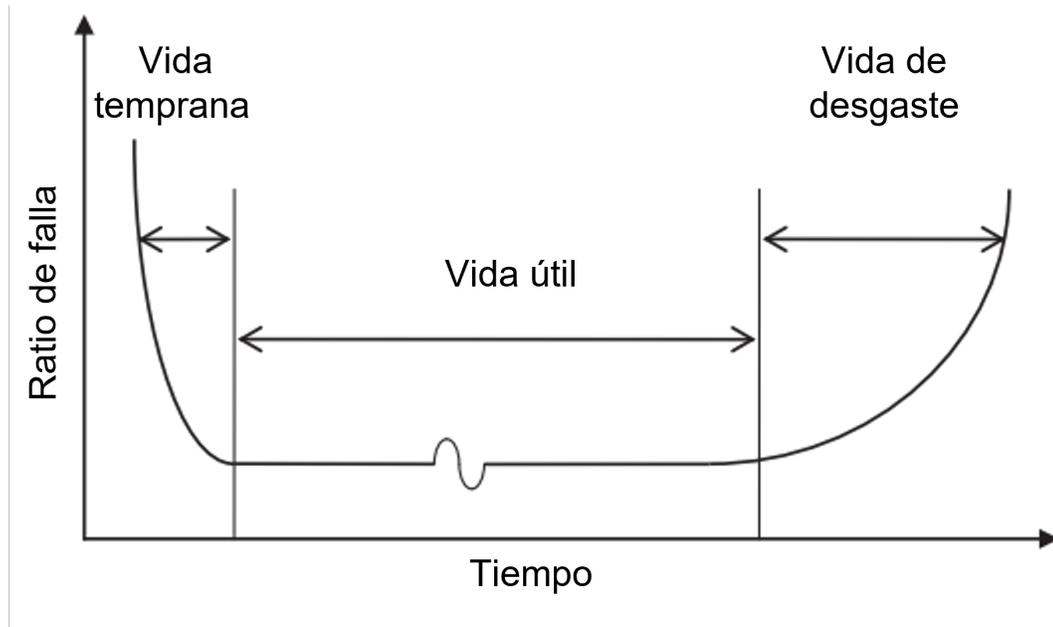


Figura 2.1: Tasa de falla de una tubería. Fuente: Singh y Adachi (2013).

Un gran desafío al momento de analizar la confiabilidad de una red de agua potable es la cantidad de tuberías y la cantidad de escenarios de falla que puede haber, ya que si se consideran fugas simultáneas, el número de escenarios total correspondería a la combinatoria de escenarios posibles, lo que aumentaría el tiempo computacional exponencialmente (Gheisi et al., 2016). Es por esto que, en general, los escenarios de falla se construyen con una única fuga.

Lee et al. (2020) proponen una metodología de redes bayesianas para estimar la funcionalidad de una red al ser impactada por una amenaza. Esta metodología se enfoca en la infraestructura crítica, donde cada componente puede fallar por la amenaza inicial, por ejemplo, un sismo; o por la falla de un componente adyacente. Se construye el grafo dirigido de la red, se modela la probabilidad de falla de cada elemento y un factor correspondiente a la pérdida de funcionalidad asociada al daño que recibe el elemento. Aplicando probabilidades condicionales por la red bayesiana, se obtiene la funcionalidad de cada componente, la funcionalidad del sistema en general y la probabilidad de falla del sistema. En la Figura 2.2 se encuentra un diagrama de flujo de la metodología.

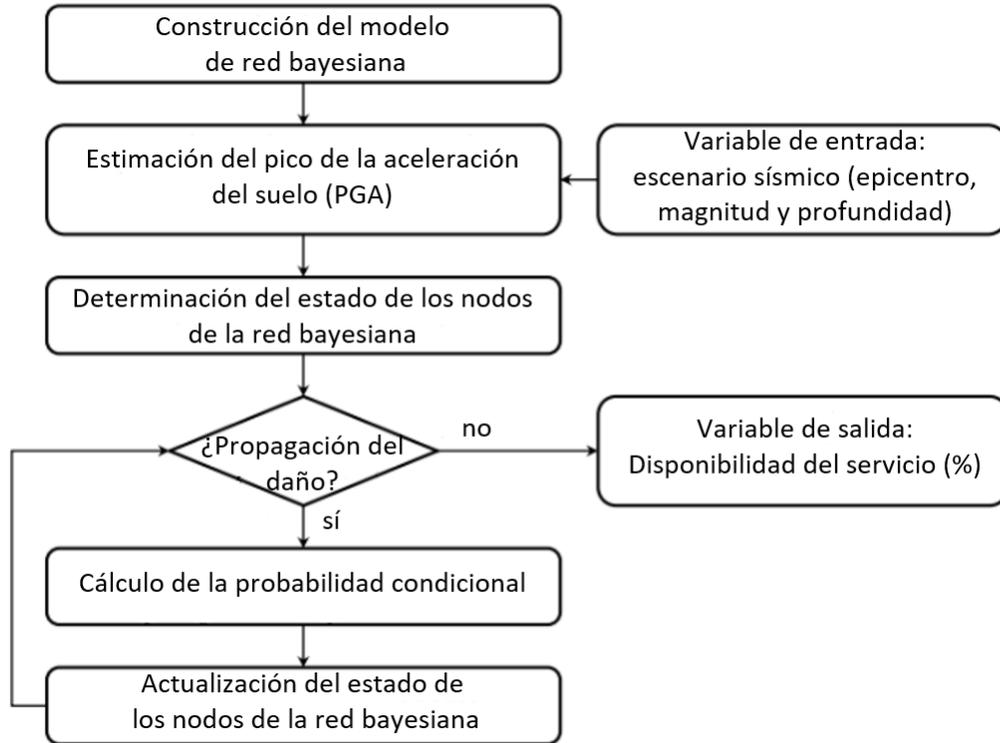


Figura 2.2: Diagrama de propagación del daño. Fuente: Lee et al. (2020).

El caso de estudio del trabajo realizado por Lee et al. (2020), corresponde a un sistema interdependiente de electricidad y agua potable, donde se considera como estructura crítica las bombas de agua, estanques de agua, plantas de agua potable, plantas de energía, subestaciones de distribución de energía y subestaciones de transmisión de energía. Es decir, es aplicable a redes de transmisión donde la cantidad de elementos es reducida, comparada con una red de distribución. También considera que el grafo asociado es un grafo dirigido, lo cual no es siempre aplicable a un sistema de distribución, donde la dirección del caudal que pasa por una tubería puede variar según las demandas del sistema.

Una metodología que sí considera el cambio en la dirección del flujo es la de Fernández (2021), la cual también fue desarrollada por el proyecto RiPRA. Esta metodología considera la propagación de un evento sísmico por la red lo que, en conjunto con la curva de fragilidad de los elementos, entrega la probabilidad de falla de cada elemento para el supuesto evento sísmico. Así se le asigna un área de fuga a cada elemento. Finalmente, realizando la simulación hidráulica se obtiene el desempeño de la red frente a la amenaza.

2.3. Criticidad

Para aplicar la metodología de Lee et al. (2020) y otras metodologías de cálculo de la confiabilidad es necesario definir los componentes críticos del sistema. Estos componentes críticos también podrían entregar información importante para decidir planes de reparación, mantenimiento y prevención para las redes.

Wang et al. (2019) describe una metodología para definir la criticidad de cada nodo de una red. Primero, se definen dos tipos de importancia: la funcional y la estructural. La importancia funcional tiene relación con la componente hidráulica y está definida como la razón entre el caudal que pasa por una tubería y el caudal total de la red; mientras que la importancia funcional es topológica, ya que es la razón entre las rutas que pasan por la tubería y el total de rutas de la red. Calculadas estas importancias, se calcula la importancia promedio. Luego, la importancia normalizada es la importancia de cada componente respecto a la suma de las importancias, así se obtiene una importancia entre 0 y 1 para cada nodo. Esta metodología permite además de hacer un *ranking* de los componentes de la red con su importancia, tener una medida de la entropía de la red. La entropía de importancia de la red se puede asumir como la criticidad de la red y permite comparar distintas redes o modificaciones en la misma red. La entropía de importancia se calcula de la siguiente forma:

$$E = - \sum_{k \in U} g(k) \ln(g(k)) \quad (2.4)$$

Donde,

E : entropía de importancia de la red, [-].

$g(k)$: importancia promedio del nodo k , [-].

U : conjunto de los nodos de la red.

2.4. Optimización de la sensorización

Para estimar el daño en una red, es posible emplear mediciones en tiempo real de algunos de sus elementos. La medida más usada para detectar anomalías en la red es la presión, ya que los sensores de presión son más baratos, necesitan menor mantención y son más fáciles de utilizar que los sensores de caudal (Datta y Sarkar, 2016; Quintiliani et al., 2020). Una optimización de la sensorización es necesaria, ya que los presupuestos destinados a la sensorización son limitados. En general, los modelos de optimización de la sensorización revisados (Zhao et al., 2020; Cheng et al., 2020; Quintiliani et al., 2020; Villez et al., 2020; Sun et al., 2019; Mukherjee et al., 2017; Steffelbauer y Fuchs-Hanusch, 2016; Nejari et al., 2015) se basan en un modelo hidráulico con incertidumbre y tantos escenarios como nodos tenga la red. Cada escenario simula una única falla y un escenario adicional en que no hay falla. El resultado es una matriz con las presiones de cada nodo. De aquí en adelante se aplica algún modelo optimización para encontrar la cantidad de sensores y la posición de estos. Algunos ejemplos de función objetivo son las costo-beneficio, minimización del costo marginal de un sensor adicional, maximización de la cobertura de los sensores, minimización de sensores, etc. Una conclusión importante del trabajo de Steffelbauer y Fuchs-Hanusch (2016), optimizado para costo-beneficio, es que la solución para de localización de una cantidad de sensores no necesariamente es subconjunto de la solución para una cantidad mayor de sensores.

El problema de localización de sensores en un problema no lineal con tantas variables como nodos tenga la red a sensorizar. Es por esto, es que la gran mayoría de metodologías usan algoritmos genéticos para encontrar una solución cercana al óptimo, usando menor tiempo

computacional que otras alternativas.

2.4.1. Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos son algoritmos de búsqueda basados en la selección natural y la genética. En un algoritmo genético, se tiene una población de individuos, cada uno de estos representa una solución factible a un problema. Cuanto mejor sea la adaptación del individuo al problema, mayor es su probabilidad de reproducirse, lo que genera nuevos individuos que comparten genes con sus padres. En el caso contrario, al tener una menor adaptación al problema, menor es la probabilidad de que sus genes sobrevivan en las generaciones futuras.

Los pasos de un algoritmo genético son los siguientes (Sivanandam y Deepa, 2007):

1. Generación de la población inicial: en un algoritmo genético simple, la población inicial se genera con individuos con genes aleatorios.
2. Evaluación del desempeño: medida de la adaptabilidad al problema de cada individuo. Estableciendo una función objetivo a optimizar, se le asigna un puntaje a cada individuo.
3. Elitismo: que el algoritmo genético considere elitismo, significa que una cantidad determinada de individuos se transfiere sin modificación a la siguiente generación. Los individuos seleccionados por el elitismo serán los que tengan mejor puntaje.
4. Selección: se seleccionan los individuos que serán los padres de la nueva generación. Existen diversas estrategias para la selección, entre ellas:
 - Selección por torneo: se escoge aleatoriamente una cantidad establecida de individuos. Luego, entre estos, se selecciona al individuo con mejor puntaje.
 - Orden lineal: la población se ordena en función a su puntaje y se le asigna una probabilidad de selección que depende de su orden.
 - Selección por ruleta: cada individuo tiene probabilidad de selección proporcional a su puntaje.
 - Selección aleatoria: los individuos seleccionan aleatoriamente.

Cabe destacar que, en general, no existe restricción a las veces que puede ser seleccionado un mismo individuo.

5. Cruce: los individuos se seleccionan en parejas y se establece una probabilidad de cruce. Si el cruce se produce, los genes de los padres se someten a un operador resultando dos nuevos individuos. En caso de que el cruce no se produzca, los individuos padres pasan a la siguiente etapa sin modificación. El operador de cruce más común es el corte, donde se transfiere una fracción de los genes de cada individuo padre a los hijos.
6. Mutación: se establece una probabilidad de mutación. En caso que un individuo sea sometido a mutación, esto significa que uno de sus genes se modifica.

El algoritmo genético es iterativo, realizando un ciclo entre los pasos 2 y 5 como se esquematiza en la Figura 2.3. El algoritmo genético finaliza si se cumple alguna de las siguientes condiciones: se alcanza el número máximo de generaciones o; alguno de los individuos alcanza un puntaje considerado óptimo.

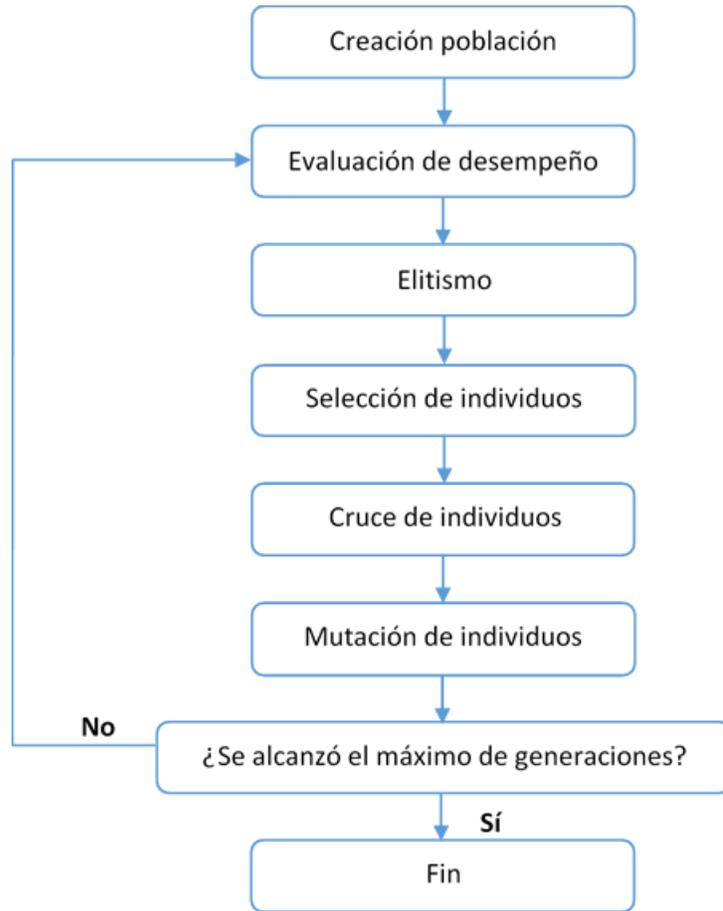


Figura 2.3: Esquema algoritmo genético. Fuente: elaboración propia.

2.4.2. Cobertura

Un factor importante para estos modelos es la cobertura, esta se usa en todos los modelos, ya sea como restricción o como función objetivo. La cobertura se puede definir de tres maneras:

- Cobertura topológica: razón entre la cantidad de escenarios de fallas detectados por los sensores y la cantidad total de fallas simuladas.

$$C_T = \frac{F_D}{F_T} \quad (2.5)$$

Con,

C_c : cobertura total, [-].

F_D : cantidad fallas detectadas.

F_T : cantidad total de fallas simuladas.

- Cobertura con enfoque en el cliente: razón entre la cantidad clientes que se encuentran dentro del área de detección de fugas de al menos un sensor y, la cantidad total de clientes de la red.

$$C_C = \frac{P_C}{P_T} \quad (2.6)$$

Con,

C_c : cobertura, [-].

P_C : cantidad de clientes que se encuentran en el área de detección de los sensores.

P_T : cantidad de clientes de la red de distribución.

- Cobertura con enfoque en la estructura: razón entre el largo de tubería cubierto por los sensores y el largo total sumado de tuberías de la red.

$$C_L = \frac{L_C}{L_T} \quad (2.7)$$

Con,

C_L : cobertura, [-].

L_C : suma de las longitudes de las tuberías que se encuentran en el área de detección de los sensores, [m].

L_T : suma de las longitudes de la tuberías de la red, [m].

En general los modelos antes citados usan la cobertura topológica, ya que está directamente ligada con los escenarios de falla generados. De esta cobertura, se deriva la cobertura sin redundancia, que se define como la fracción de fallas que fueron detectadas por un solo sensor y la cantidad total de fallas.

$$C_1 = \frac{\sum I_i}{F_T} \quad (2.8)$$

Con,

$$I_i = \begin{cases} 1 & \text{la falla } i \text{ es detectada por único sensor} \\ 0 & \text{la falla no es detectada o lo es pero por 2 o más sensores} \end{cases} \quad (2.9)$$

Siendo,

DCR : cobertura sin redundancia, [-].

I_i : función indicadora de redundancia, [-].

F_T : total de fallas.

Modificando la función indicadora, se pueden definir otras coberturas; como cobertura la cobertura con redundancia contando las fallas que son detectadas por más de un sensor.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Modelación hidráulica de la red

La modelación hidráulica de la red es una base del proyecto, ya que en ella se sustentan todos los cálculos posteriores. La modelación se realiza a través *WNTR*, que es el paquete de *Python* para el análisis de sistemas de distribución de agua potable desarrollado por la *US EPA* (Klise et al., 2017). La selección de este paquete se decide por su enfoque en redes de agua potable y su carácter de *software* libre.

Todas las simulaciones se hacen en régimen dinámico basado en presiones, según la relación física propuesta por Wagner et al. (1988) representada en la Figura 3.1, con presión mínima 4 m.c.a. y presión requerida 14 m.c.a. Estas presiones son las establecidas en la norma NCh 2485 Of. 2000 (Instituto Nacional de Normalización, 2000).

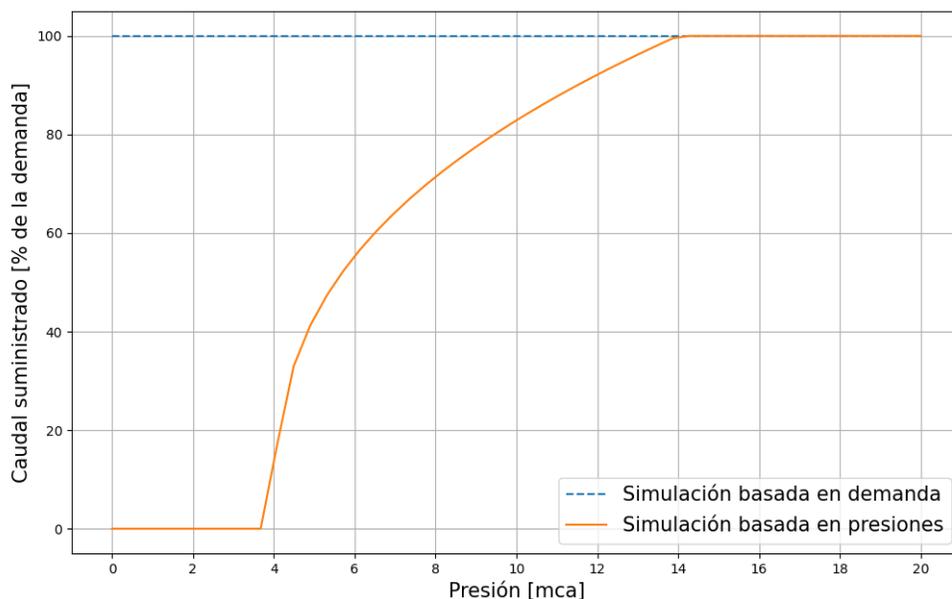


Figura 3.1: Respuesta del caudal a la pérdida de presión. Fuente: Wagner et al. (1988).

Las *toy networks* a utilizar tienen forma de malla rectangular. La elevación disminuye

radialmente desde una de las fuentes. Las tuberías son de asbesto-cemento y su diámetro depende su ubicación en la red. Estas reciben su nombre por la cantidad de uniones que poseen. La cantidad de elementos que posee cada una se muestra en la Tabla 3.1. La distribución de la elevación de los nodos y distribución de los diámetros de las tuberías, se representan en las Figuras 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5.

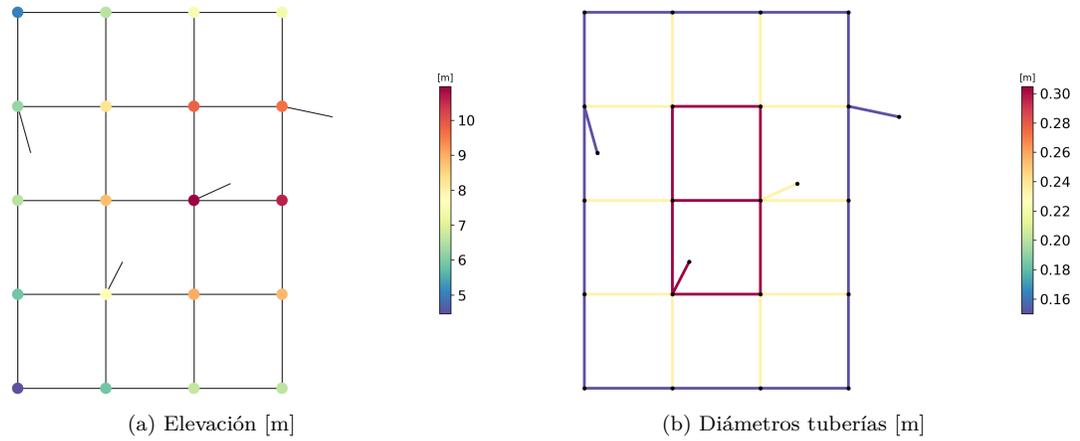


Figura 3.2: Red20. Fuente: elaboración propia.

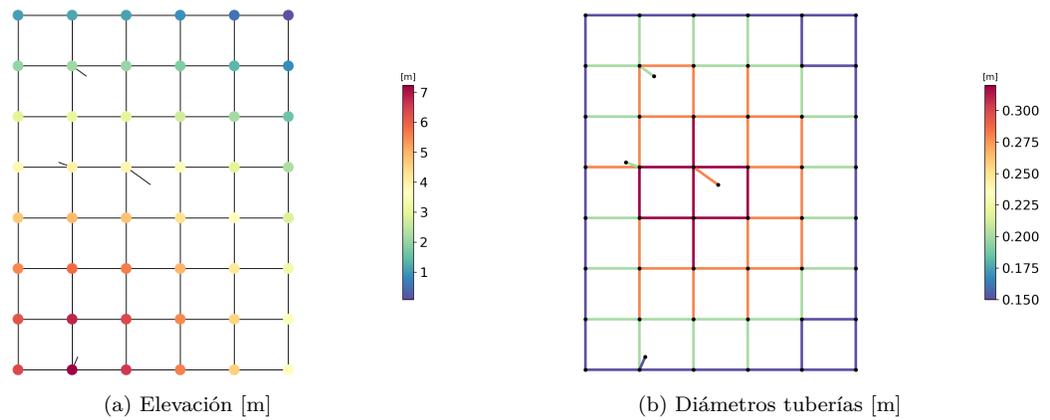


Figura 3.3: Red48. Fuente: elaboración propia.

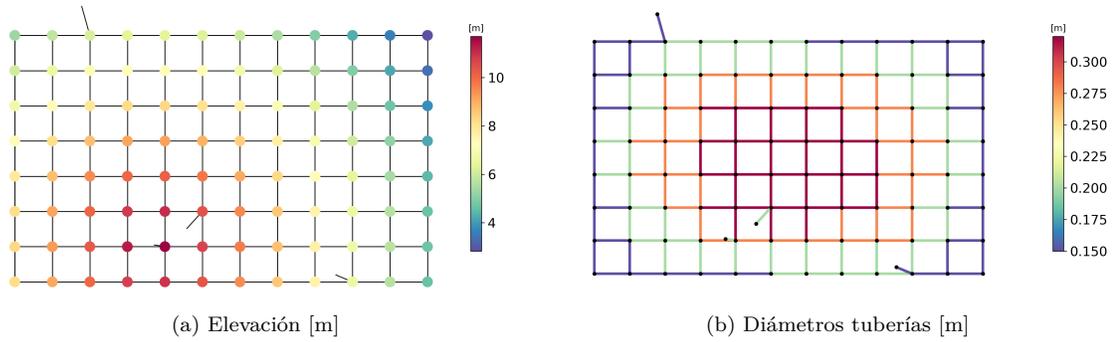


Figura 3.4: Red96. Fuente: elaboración propia.

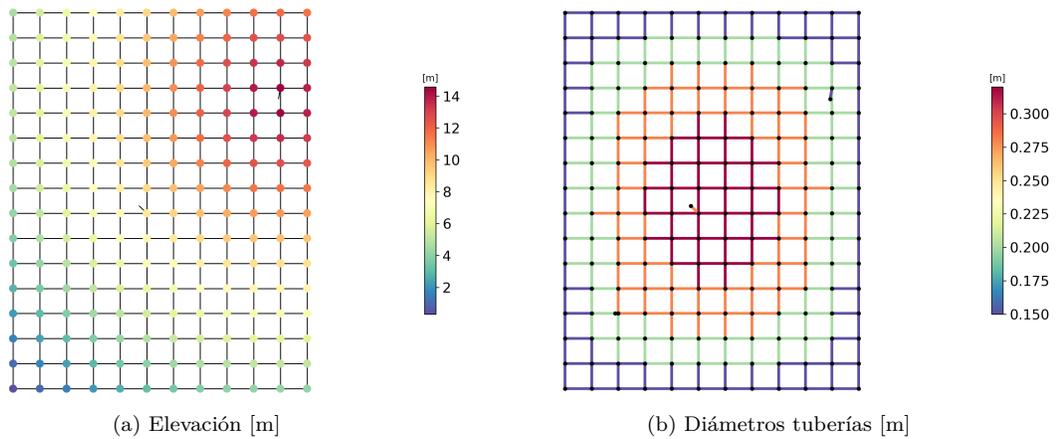


Figura 3.5: Red192. Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.1: Descripción redes. Fuente: elaboración propia.

	Red20	Red48	Red96	Red192
Nodos	24	52	100	195
Uniones	20	48	96	192
Reservorios	4	4	4	3
Tuberías	35	86	176	359

3.2. Confiabilidad de la red

Para evaluar la confiabilidad de una red, se calcula su resiliencia frente a un evento sísmico. Para esto, se realiza la simulación hidráulica de la red en funcionamiento normal, sin daños, y se compara con su funcionamiento en escenarios de eventos sísmicos y su posterior recuperación a través de diversos planes de reparación. Un resumen de la metodología se esquematiza en la Figura 3.6.

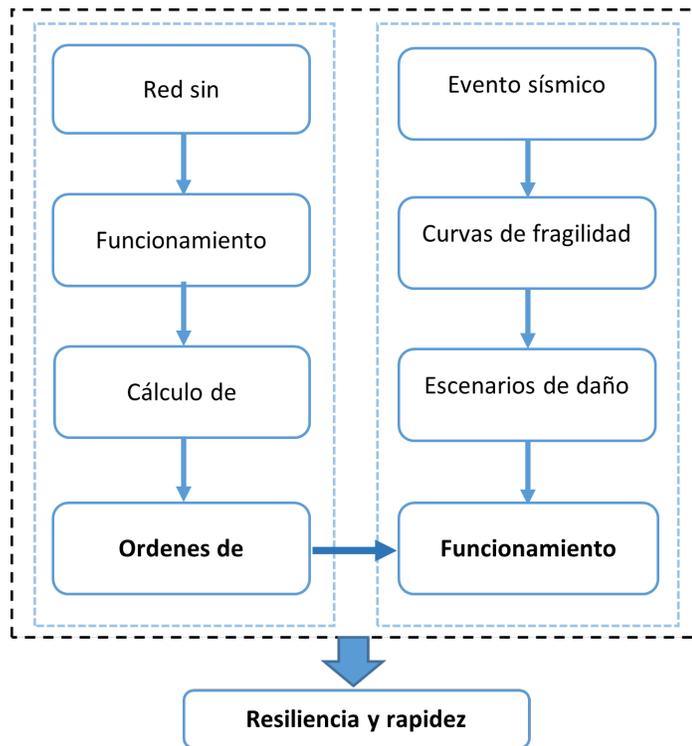


Figura 3.6: Diagrama de metodología para la evaluación de la resiliencia.
Fuente: elaboración propia.

Para analizar el funcionamiento de la red se evalúa las mismas métricas de desempeño usadas por Fernández (2021):

- Disponibilidad del servicio de agua potable: también conocido por sus siglas en inglés, WSA, corresponde al cociente entre la demanda y demanda esperada.
- Presión requerida: se evalúa como un índice de cumplimiento de la norma, es decir, la fracción de nodos que tienen una presión mayor o igual a 14 m.c.a.
- Presión mínima: se evalúa como un índice de cumplimiento de la norma, es decir, la fracción de nodos que tienen una presión mayor o igual a 4 m.c.a.
- Índice de Todini.
- Entropía.

3.2.1. Criticidad

Se analizan como métricas de criticidad las mismas usadas por Fernández (2021). Para el cálculo de estas métricas se usa del paquete *NetworkX* de *Python*, que ya las tiene implementadas.

- Centralidad interposición: corresponde a la cantidad de veces en que un nodo es parte de una ruta crítica. Considerando ruta crítica como la ruta con menor cantidad de tuberías que va desde un nodo a otro.

- Centralidad de cercanía: es una medida relativa de la distancia en metros que separa un nodo con todos los demás. Mientras la suma de la longitud de los caminos geodésicos a los demás nodos es mayor, menor es la centralidad.
- Grado nodal: cantidad de tuberías que conectan con el nodo.
- Puntos de articulación: un nodo es punto de articulación si su desconexión conlleva a que parte de de la red quede inconexa.
- Puentes: una tubería es puente si su desconexión conlleva a que parte de la red quede inconexa.

Adicionalmente, se evalúan las métricas propuestas por Wang et al. (2019). Su metodología se detalla a continuación.

Wang et al. (2019) propone que cada nodo de la red tiene una importancia funcional y estructural. La importancia funcional se refiere a la influencia que tiene en la capacidad de distribución de la red, mientras que la importancia estructural se refiere influencia en la conectividad de la red.

3.2.1.1. Importancia funcional

La importancia funcional relaciona los caudales de cada nodo con la demanda total de la red.

$$\eta(k) = \frac{q(k)}{Q} \quad (3.1)$$

Donde,

$q(k)$: caudal que pasa por el nodo k , [m^3/s].

Q : caudal total que se fluye por la red, [m^3/s]

$\eta(k)$: importancia funcional del nodo k , [-].

La importancia funcional se calcula para cada instante de tiempo de la simulación dinámica. De ella se derivan dos resultados: la importancia funcional cuando la demanda de caudal es máxima (importancia funcional en demanda máxima) y el promedio temporal de la importancia funcional (importancia funcional media).

3.2.1.2. Importancia estructural

La importancia estructural relaciona las rutas que pasan por cada nodo con la cantidad total de rutas de la red.

$$\delta = \sum_{i \neq j} \delta_{ij} \quad (3.2)$$

Sea

δ_{ij} : cantidad de rutas entre el nodo i y j .

δ : total de rutas del sistema.

Luego, el número de rutas que pasan por el nodo k se define como:

$$\delta(k) = \sum_{i \neq j \neq k} \delta_{ij}(k) \quad (3.3)$$

Con,

$\delta(K)$: cantidad de rutas que pasan por el nodo k .

$\delta_{ij}(k)$: cantidad de rutas desde i a j que pasan por k .

La importancia estructural del nodo k se calcula como:

$$C(k) = \frac{\delta(k)}{\delta} \quad (3.4)$$

Siendo,

$C(k)$: importancia estructural del nodo k , [-].

$\delta(K)$: cantidad de rutas que pasan por el nodo k .

δ : total de rutas del sistema.

El cálculo de las rutas de la red se realiza utilizando las herramientas de *NetworkX*.

3.2.1.3. Importancia promedio

La importancia promedio se calcula como la media aritmética de ambas importancias:

$$W(k) = \frac{1}{2}(C(k) + \eta(k)) \quad (3.5)$$

Con,

$W(k)$: importancia promedio del nodo k , [-].

$C(k)$: importancia estructural del nodo k , [-].

$\eta(k)$: importancia funcional del nodo k , [-].

Al utilizar la importancia funcional promedio y la demanda funcional en demanda máxima, se obtiene la importancia promedio media y la importancia promedio en demanda máxima.

3.2.2. Escenarios de daño

Para generar cada escenario de daño, se simula un evento sísmico compuesto por un sismo y una réplica, que ocurren en las horas 5 y 7 de la simulación hidráulica, respectivamente. La selección de este horario fijo arbitrario, se realiza por simplicidad, ya que así se pueden comparar las respuestas al daño y la reparación de manera más directa. Por su parte, la magnitud, epicentro y profundidad siguen las siguientes distribuciones arbitrarias:

- Magnitud sismo (S_1): uniforme entre 7,5 y 8,5 [Richter].
- Magnitud réplica (S_2): uniforme entre ($S_1-2,5$) y (S_1-1) [Richter].
- Profundidad hipocentro: uniforme entre 1500 y 3000 metros.
- Epicentro: uniforme entre 30 y 80 kilómetros al sur del centro de la red.

La elección del rango de sismos es para representar sismos de gran intensidad y réplicas de magnitud media y media alta. El rango de epicentros y profundidades se establecen así para que en su caso más favorable, más lejano a la red, siempre se genere daño, y en su caso más desfavorable, más cerca de la red, el modelo hidráulico siga siendo funcional.

Para obtener la aceleración máxima del suelo en cada nodo, se utiliza modelo de propagación sísmica integrado en el paquete *WNTR*, que corresponde al promedio entre los modelos de Kawashima et al. (1984), Baag et al. (1998) y, Lee y Cho (2002).

Para estimar la probabilidad de falla de las tuberías, se utilizan las curvas de distribución lognormal propuestas por Garvs (2020) para las tuberías de asbesto-cemento, Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Parámetros curvas de fragilidad para tuberías de asbesto-cemento. Fuente: Garvs (2020).

Mayor		Moderado	
Promedio	Desviación	Promedio	Desviación
0.225	0.385	0.163	0.375

Las distribuciones para daño moderado y daño mayor obtenidas con estos parámetros se muestran en la Figura 3.7.

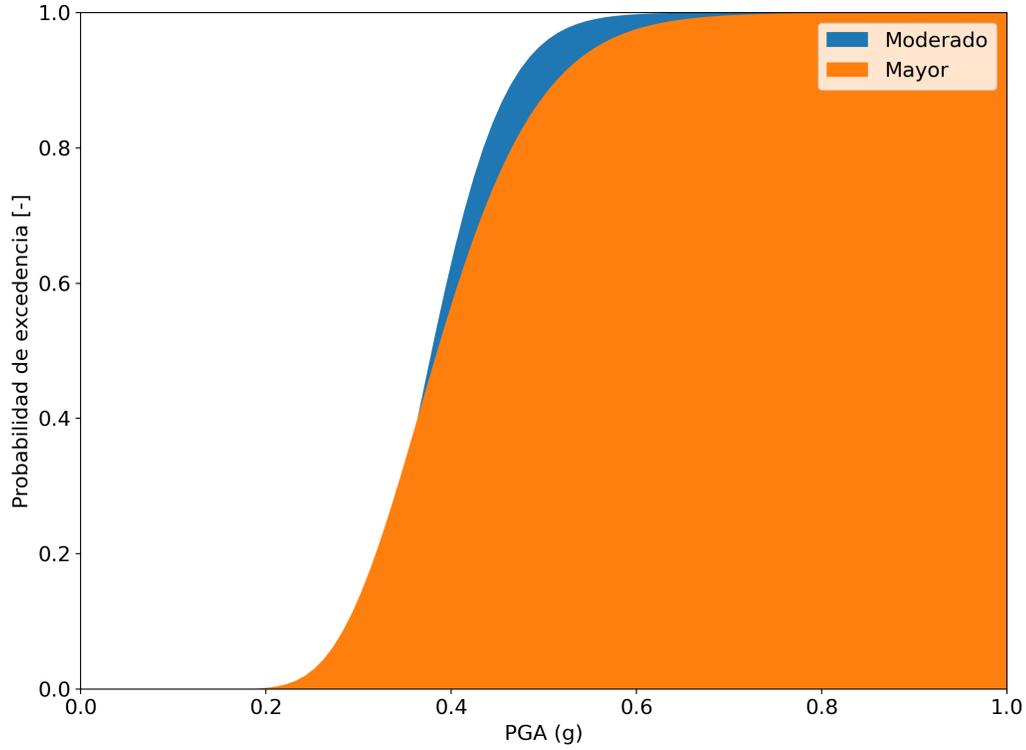


Figura 3.7: Curvas de fragilidad para tuberías de asbesto-cemento. Fuente: Garvs (2020).

Luego, el área de fuga de un nodo se calcula como una combinación lineal del diámetro de las tuberías y un factor del daño.

$$A_i = \sum_{j \in U_i} A_j \alpha_j \quad (3.6)$$

Con,

A_i : área de la fuga del nodo i .

A_j : área de la tubería j .

U_i : conjunto de las tuberías conectadas al nodo i .

α : factor de daño recibido por la tubería j ; 1 milésima para daño moderado y 5 milésimas para daño mayor.

Esta área se calcula para el sismo y su réplica. Si en la réplica no hay daño, la fuga comienza cuando ocurre el sismo; si ambos eventos generan daño, la fuga tiene área igual a la suma de las áreas y comienza en la hora intermedia entre ambos eventos; si solo la réplica provoca daño, la fuga comienza cuando ocurre la réplica.

Usando lo anterior, se generan 1000 escenarios de daño para la *toy network* “Red20” y

250 para la *toy network* “Red48”.

3.2.3. Orden de reparación

La reparación de los elementos se realiza un elemento por hora, iniciando desde la hora 6 de la simulación hidráulica. El orden de reparación de los elementos dañados es de forma descendente según la criticidad de los elementos. Entendiendo que para todas las métricas cuantitativas, un mayor valor de la misma indica que el elemento es más crítico. Se evalúan las siguientes métricas de criticidad:

- Importancia estructural.
- Importancia funcional media.
- Importancia funcional en máxima demanda.
- Importancia promedio media.
- Importancia promedio en máxima demanda.
- Centralidad de cercanía.
- Centralidad interposición.
- Grado nodal.

Para el caso de plan de reparación dado por los puntos de articulación, se reparan en orden aleatorio los nodos que poseen esta característica y luego, aleatoriamente, los restantes. Análogamente, para los puentes; se reparan en orden aleatorio los nodos que están conectados a un puente y luego, aleatoriamente, los restantes.

3.2.4. Resiliencia y rapidez

La rapidez corresponde al tiempo ocurrido entre el evento sísmico y la recuperación del régimen normal de cada métrica según cada orden de reparación.

Finalmente, se calcula la resiliencia como la integral de la recuperación de funcionalidad en el tiempo dividida por la rapidez como muestra la ecuación 3.7. Entendiendo cada una de las métricas de desempeño como una funcionalidad independiente, se calcula la resiliencia para cada una de ellas, según cada orden de reparación. Un diagrama para entender el cálculo se presenta en la figura 3.8.

$$RS_{i,j} = \frac{1}{T_{r_{i,j}}} \int_{t_0}^{T_{r_{i,j}}} Q_{i,j}(t) dt \quad (3.7)$$

Donde,

$RS_{i,j}$: resiliencia de la métrica i con el orden de reparación j .

$T_{r_{i,j}}$: rapidez de cada método de reparación i con el orden de reparación j .

t_0 : tiempo en que inicia el evento sísmico.

$RS_{i,j}(t)$: valor de la métrica i con el orden de reparación j en el tiempo t .

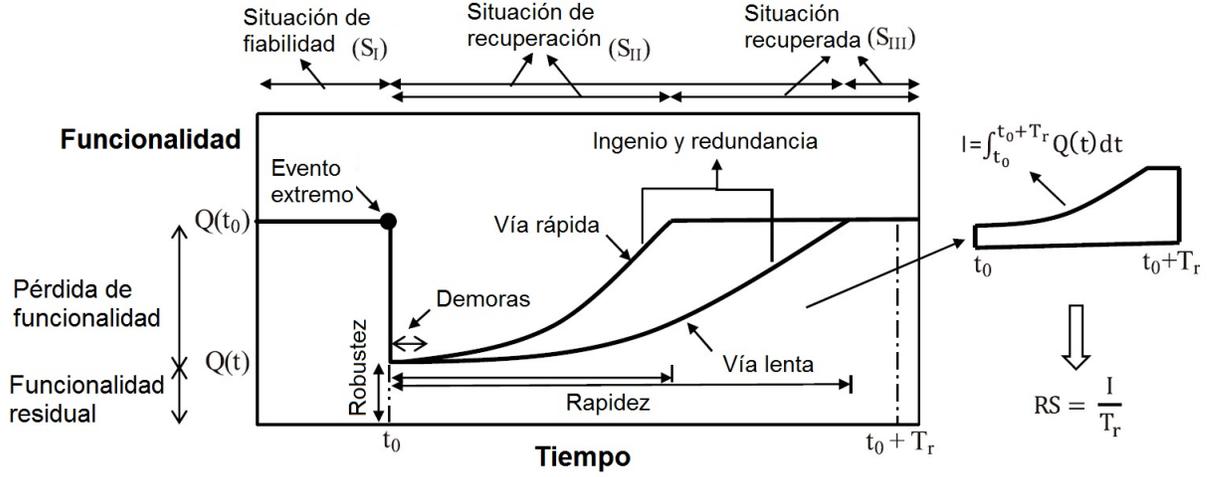


Figura 3.8: Diagrama del cálculo de resiliencia. Fuente: Anwar et al. (2019).

Para comparar la resiliencia se definen: la resiliencia normalizada y resiliencia relativa.

$$\overline{RS}_{i,j} = \frac{RS_{i,j}}{RS_{i,max}} \quad (3.8)$$

Con,

$\overline{RS}_{i,j}$: resiliencia normalizada de la métrica i con el orden de reparación j .

$RS_{i,j}$: resiliencia de la métrica i con el orden de reparación j .

$RS_{i,max}$: resiliencia máxima de la métrica i .

$$\widehat{RS}_{i,j} = \frac{RS_{i,j} - RS_{i,min}}{RS_{i,max} - RS_{i,min}} \quad (3.9)$$

Con,

$\widehat{RS}_{i,j}$: resiliencia relativa de la métrica i con el orden de reparación j .

$RS_{i,j}$: resiliencia de la métrica i con el orden de reparación j .

$RS_{i,max}$: resiliencia máxima de la métrica i .

$RS_{i,min}$: resiliencia mínima de la métrica i .

3.3. Optimización de la sensorización

Esta metodología se divide en dos etapas; optimización de la localización de un número fijo de sensores usando algoritmos genéticos y optimización de la cantidad de sensores usando análisis costo-beneficio. La primera etapa se compone de la generación de escenarios de falla, cálculo de la matriz residual de presiones, selección del umbral de detección y la optimización de la localización de los sensores. La segunda etapa realiza un análisis costo beneficio de las coberturas, obtenidas de la etapa 1, y la cantidad de sensores de esa localización óptima. La Figura 3.9 esquematiza la metodología.

Un aspecto importante de esta metodología, es que considera que los sensores se ubican en las uniones de la red.

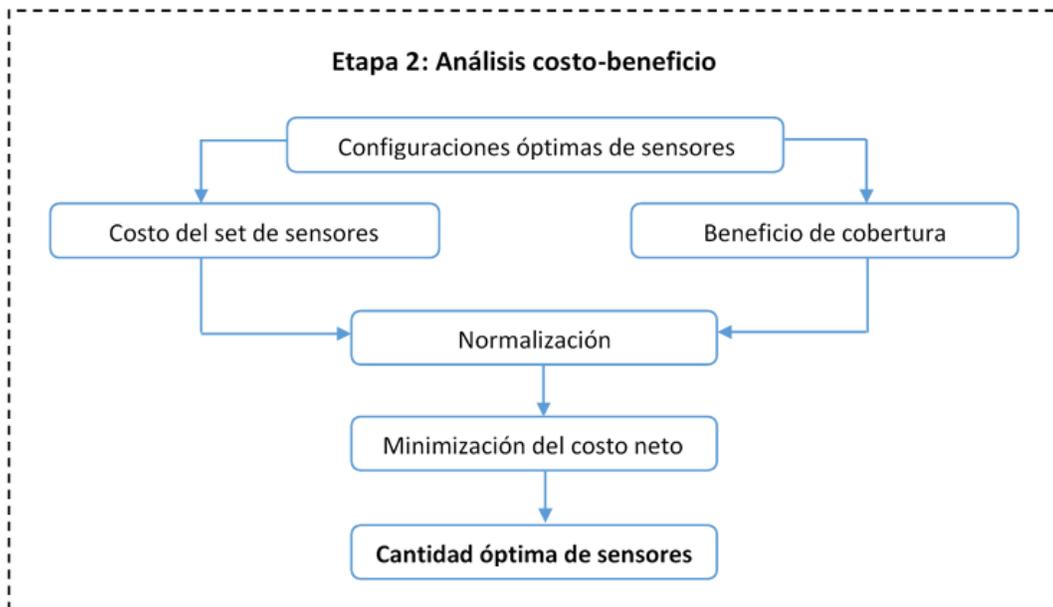
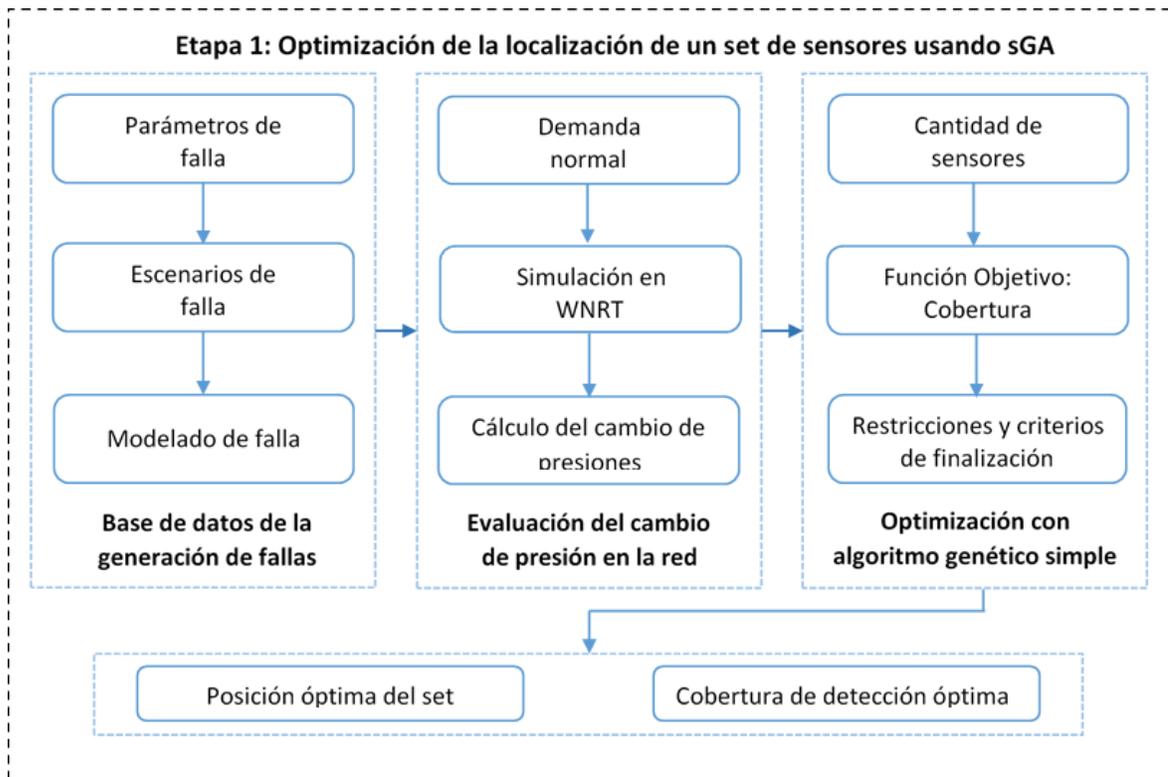


Figura 3.9: Diagrama de metodología de optimización de la sensorización.
Fuente: elaboración propia.

3.3.1. Escenarios de falla

Cada escenario de falla considera que se produce un evento de daño en una única unión de la red, y es modelado con una fuga circular. Se generan tantos escenarios como uniones.

Antes de definir el área de fuga para cada caso, se calcula el área característica de la unión:

$$A_i = \frac{\bar{D}_i^2 \pi}{4} \quad (3.10)$$

Donde,

\bar{D}_i : diámetro promedio de las tuberías que conectan con la unión i , [m].

A_i : de área característica de la unión i , [m].

El área de fuga se establece como el 5% del área característica.

$$A_{fuga}(i) = A_i \frac{5}{100} \quad (3.11)$$

Donde,

$A_{fuga}(i)$: diámetro de la fuga del nodo i , [m].

A_i : de área característica de la unión i . [m].

3.3.2. Matriz de presiones

Realizadas las simulaciones hidráulicas para los escenarios de falla, se extraen los resultados de las presiones de cada unión de la red en el tiempo posterior al daño en la red, es decir, una hora después. Así se obtiene una matriz cuadrada de presiones. Al restar esta matriz a las presiones en escenario de funcionamiento sin fallas, se obtiene la diferencia de presión entre el funcionamiento de la red sin daño y la red dañada, para cada unión en cada escenario; la matriz resultante se denomina matriz de residual de presiones.

$$R_{i,j} = P_{0,j} - P_{i,j} \quad (3.12)$$

$R_{i,j}$: residual de presión de la unión j cuando falla la unión i , [mca].

$P_{0,j}$: presión en condición normal del unión j , [mca].

$P_{i,j}$: presión de la unión j cuando falla la unión i , [mca].

Esta matriz representa el nivel de impacto e información, en terminos del cambio de presión, que produce una fuga.

3.3.3. Presión umbral

La presión umbral corresponde al residual de presión mínimo para el cual se considera que ocurrió una falla. Este valor debe ser mayor a la sensibilidad del sensor. Con la presión umbral y la matriz residual, se calcula la matriz de fallas detectables:

$$G_{i,j} = \begin{cases} 1 & R_{i,j} > P_{umbral} \\ 0 & R_{i,j} < P_{umbral} \end{cases} \quad (3.13)$$

Para establecer la presión umbral se debe tener en cuenta, que un umbral demasiado bajo podría conllevar a falsos positivos por cambios puntuales en la demanda, por lo que es preferible aumentar el umbral, aunque esto signifique una menor cobertura. Teniendo en cuenta lo anterior, se ordenan los máximos residuales de cada escenario de mayor a menor y se selecciona la presión equivalente al cuantil 90 %, obteniéndose una matriz de fallas detectables con menor carga de valores 1. Al realizar este aumento de la presión umbral, la cobertura total máxima detectable disminuye y se calcula de la siguiente forma:

$$C_{T_{max}} = \frac{[0.90 * N]}{N} \quad (3.14)$$

Con N el número de uniones de la red.

3.3.4. Algoritmo genético

El algoritmo no considera elitismo y establece como función objetivo, la cobertura sin redundancia. Los individuos serán los sets de sensores, es decir, una lista de los nodos sensorizados; así los genes corresponden a las uniones. Los parámetros para el algoritmo genético, son los propuestos por Cheng et al. (2020): la selección será por torneo de 5 individuos. La probabilidad de cruce es de un 90 % y la de mutación de 1 %.

El cruce se hará cortando la lista en un lugar aleatorio. Un ejemplo de esta operación se muestra en la Figura 3.10, considerando sets de 5 sensores y que aleatoriamente el corte se produce entre el segundo y tercer sensor.

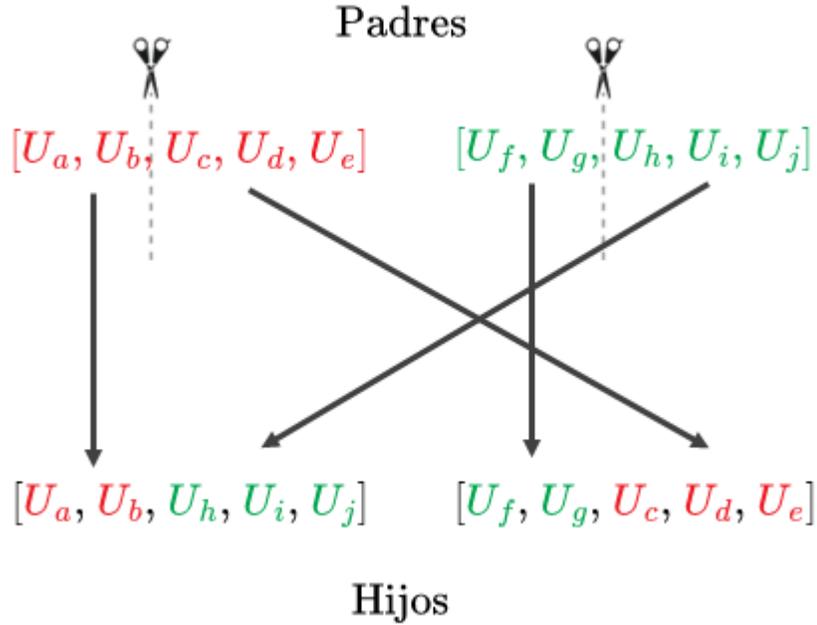


Figura 3.10: Ejemplo de cruce. Fuente: elaboración propia.

En caso de mutación el sensor se traslada aleatoriamente a otra unión.

3.3.5. Análisis costo-beneficio

Utilizando el algoritmo genético para diferentes cantidades de sensores, se obtiene la cobertura óptima y localización según la cantidad de sensores. Para seleccionar el set más conveniente, se realiza un análisis costo-beneficio, relacionando el costo de la cantidad de sensores y el beneficio de la cobertura. El análisis se normaliza para cada variable, para excluir el valor de los sensores de la evaluación.

- Costo de inversión normalizado:

$$IC(N) = \frac{N - N_{min}}{N_{max} - N_{min}} \quad (3.15)$$

N : cantidad de sensores.

- Beneficio normalizado, se calcula como la cobertura normalizada:

$$DCR(N) = \frac{C(N) - C(N_{min})}{C(N_{max}) - C(N_{min})} \quad (3.16)$$

C : cobertura total.

- Costo de fallas no cubiertas:

$$UCR(N) = 1 - DCR(N) \quad (3.17)$$

- Costo neto de la red

$$NC = IC + UCR \quad (3.18)$$

Minimizando el costo neto, se obtiene la cantidad óptima de sensores.

3.3.6. Aplicación de la metodología

Para obtener un modelo que estime el tiempo computacional de La primera etapa de la metodología se aplica a las *toy networks* “Red48”, “Red196” y “Red192”, variando la cantidad de iteraciones y el tamaño de la población.

La metodología completa se aplica a la *toy network* “Red20”. La aplicación de la etapa 1 de la metodología a la “Red20” para 12 escenarios; estos escenarios corresponden a la localización de 3 a 14 sensores. Cada escenario se implementó con una población 1000 veces la cantidad de sensores, 500 iteraciones y presión umbral equivalente al cuantil 90% de la matriz de restos de presiones. Luego, de la segunda etapa se obtiene set óptimo.

Capítulo 4

Resultados y discusiones

4.1. Criticidad y resiliencia de la red

Los resultados para las *toy networks* de 20 y 48 uniones, “Red20” y “Red48”, son análogos. Dado esto, las tablas y figuras presentadas en esta sección corresponden principalmente a los de “Red48”; las figuras resultantes del análisis de “Red20” se encuentran en el Apéndice A.1.

4.1.1. Importancia estructural, funcional y promedio

Al aplicar la metodología propuesta por Wang et al. (2019), se obtienen los siguientes resultados.

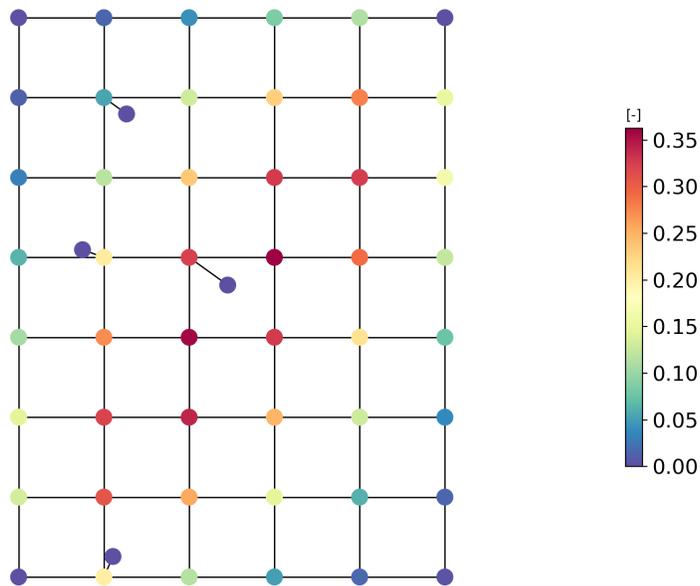


Figura 4.1: Importancia estructural “Red48”. Fuente: elaboración propia.

La importancia estructural es mayor en la diagonal suroeste-noreste, presentando los mayores valores en el centro de la red. La distribución de sus valores es similar a los obtenidos

de la centralidad interposición. Cabe destacar que, el cálculo de la centralidad de cercanía también está relacionado con la cantidad de rutas en que cada nodo participa, pero tiene la ventaja de estar implementada en el paquete *NetworkX* de *Python* y tener un tiempo de cálculo computacional mucho menor.

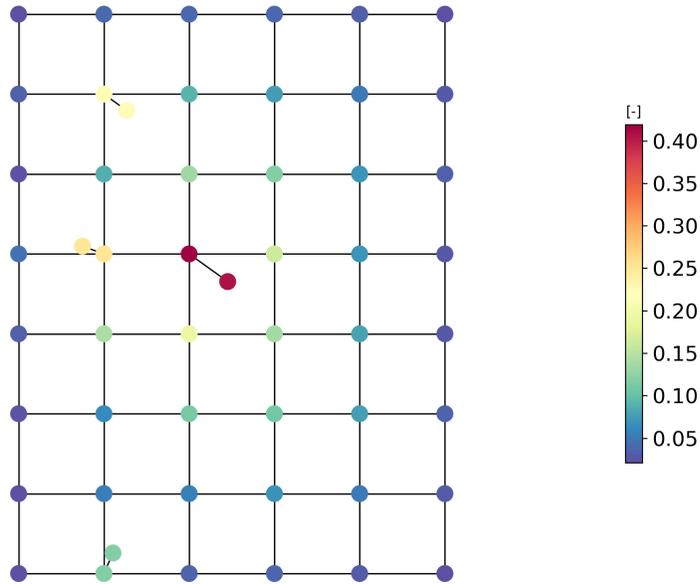


Figura 4.2: Importancia funcional media “Red48”. Fuente: elaboración propia.

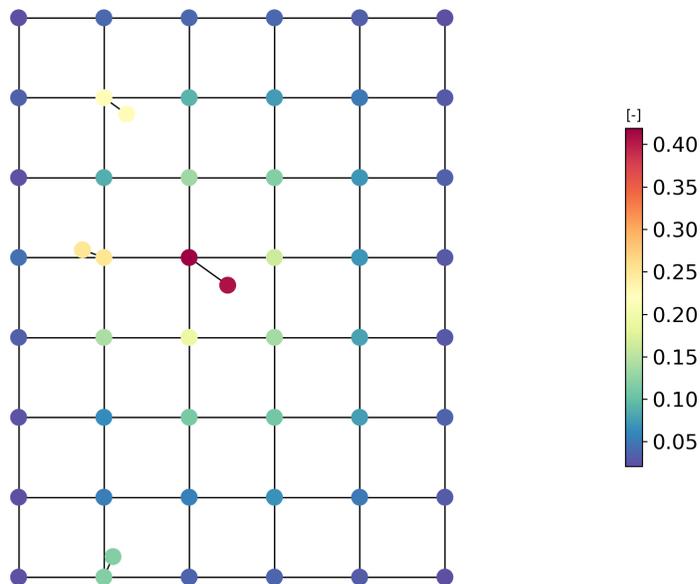


Figura 4.3: Importancia funcional en demanda máxima “Red48”. Fuente: elaboración propia.

En la Figuras 4.2 y 4.3 se observa que los nodos con mayor importancia funcional son los reservorios y los nodos inmediatamente aguas abajo. Es importante notar que los valores

de la importancia funcional no cambian al considerar su promedio o su valor en demanda máxima. Esto se explica porque, si bien las demandas esperadas cambian en el tiempo y de un nodo a otro, los patrones de demanda para esta red son iguales.

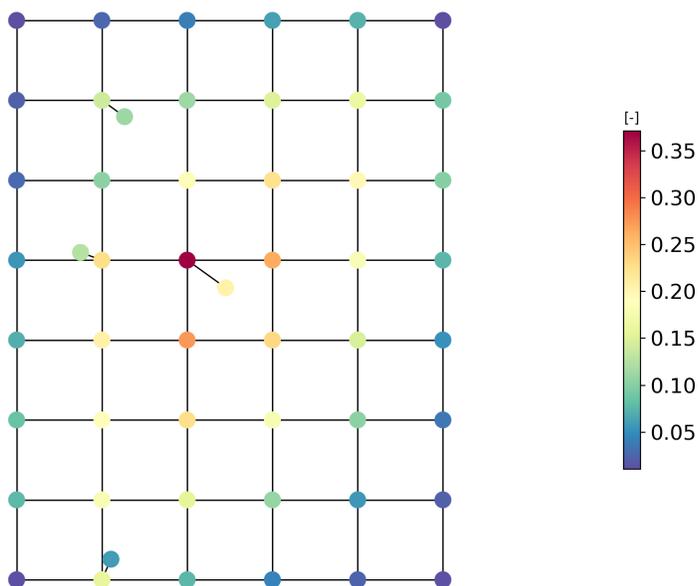


Figura 4.4: Importancia promedio media “Red48”. Fuente: elaboración propia.

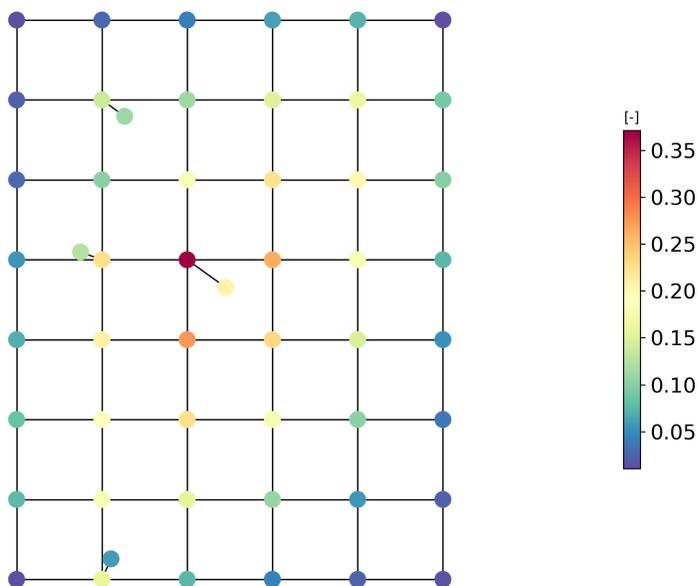


Figura 4.5: Importancia promedio en demanda máxima “Red48”. Fuente: elaboración propia.

Dada la igualdad en ambas importancias funcionales, las importancias promedio, ilustradas en las Figuras 4.4 y 4.5, también son iguales entre si. Los nodos que tienen mayor importancia se encuentran al centro de la cuadrícula, siendo más importante el que se en-

cuentra conectado al reservorio central. Este resulta ser clave en la red, ya que presenta un alto valor de grado nodal, centralidad interposición e importancia, además de ser un punto de articulación y estar conectado a un puente.

4.1.2. Amenaza y reparación

El comportamiento promedio de las métricas hidráulicas respecto al comportamiento normal para cada instante de tiempo, se visualiza en las Figuras 4.6 a 4.10. En cada una de estas figuras se muestran 12 curvas. Una de ellas corresponde al funcionamiento normal de la métrica, “red sin daño” y cada una de las otras once corresponde al valor promedio de esa métrica considerando su valor en cada simulación de sismo-reparación, para cada orden de reparación propuesto.

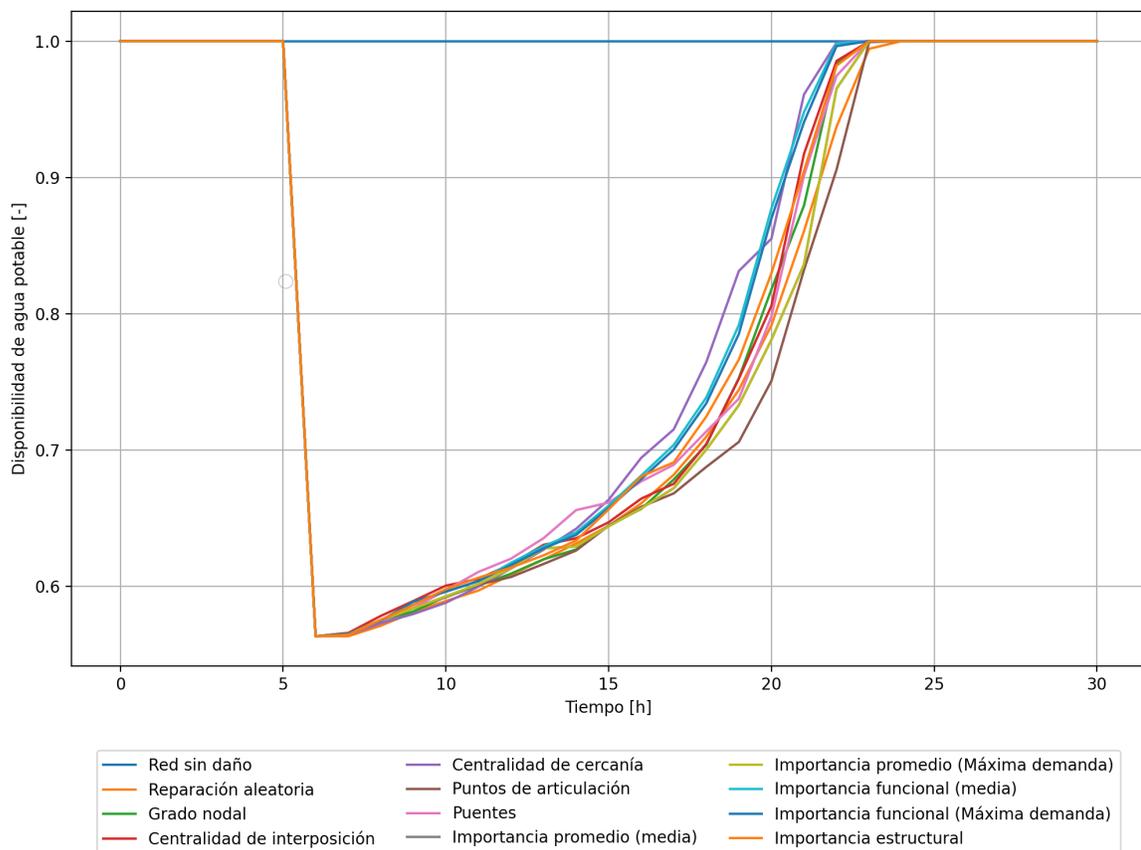


Figura 4.6: Disponibilidad del servicio de agua potable “Red48”. Fuente: elaboración propia.

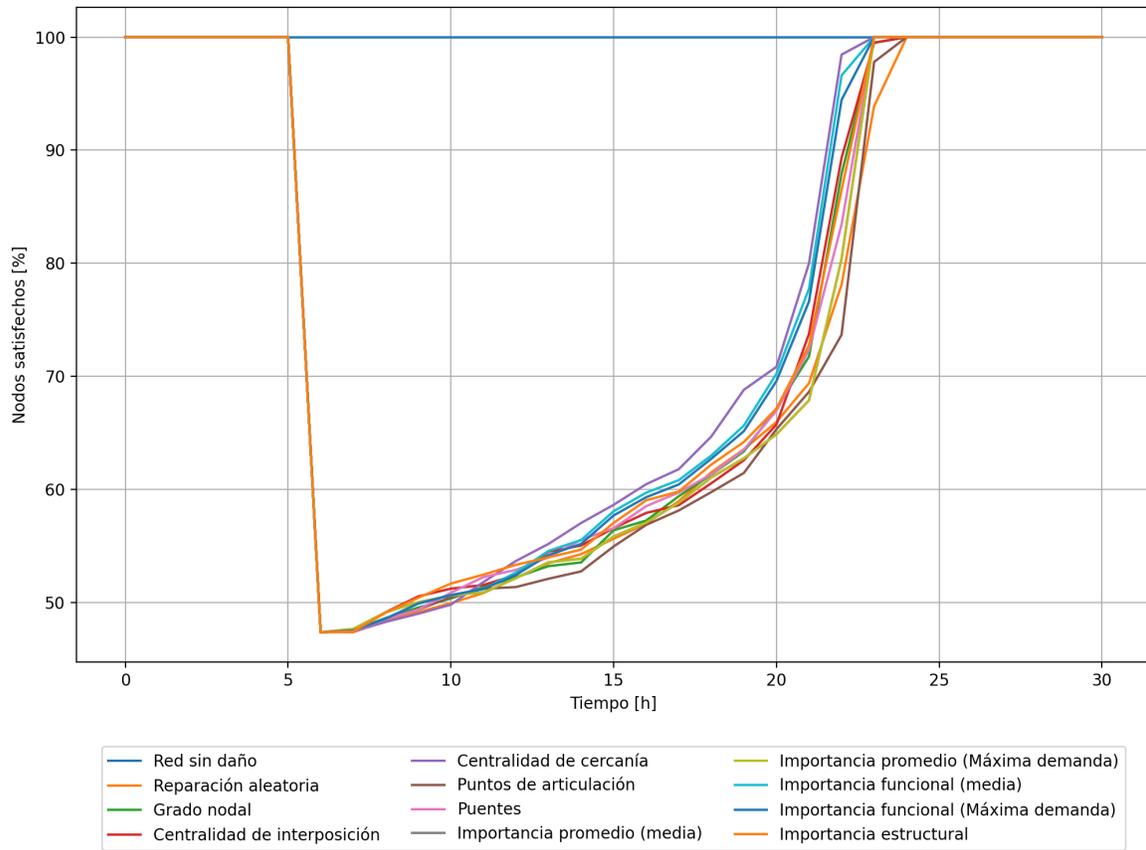


Figura 4.7: Factor de cumplimiento de la presión requerida “Red48”. Fuente: elaboración propia.

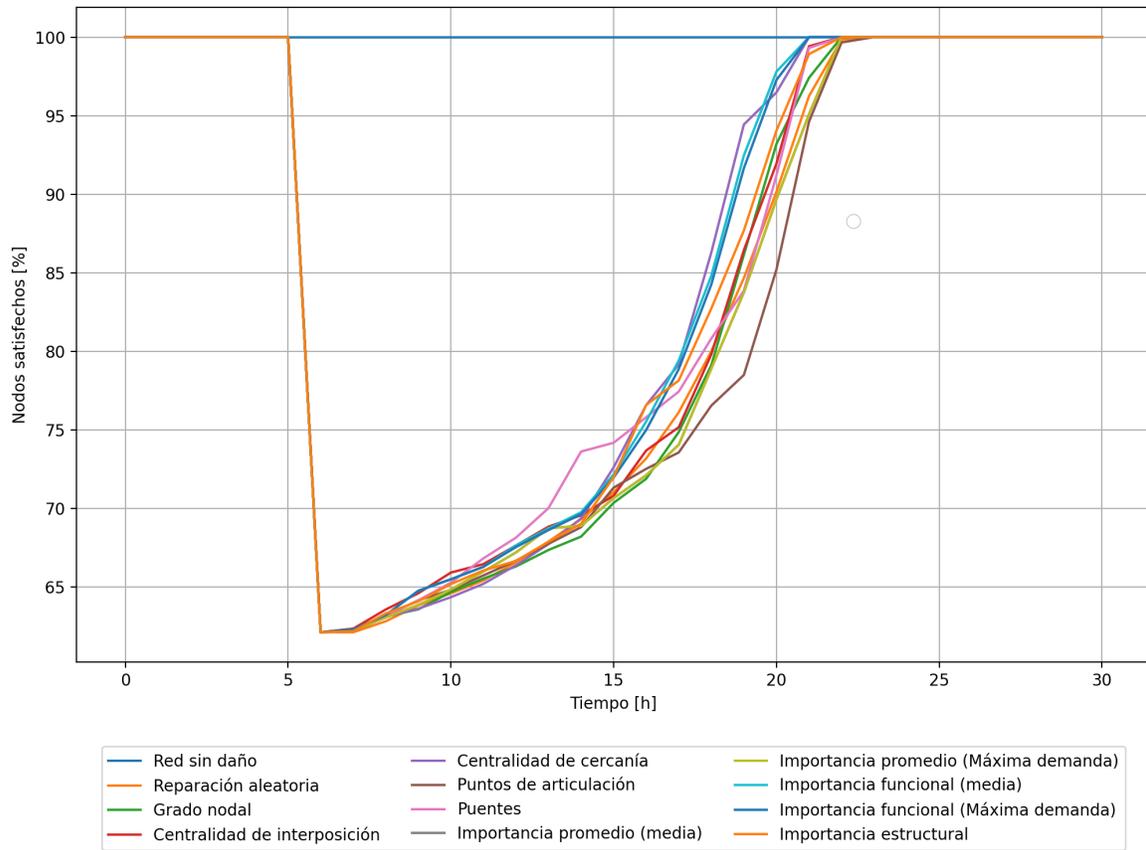


Figura 4.8: Factor de cumplimiento de la presión mínima “Red48”. Fuente: elaboración propia.

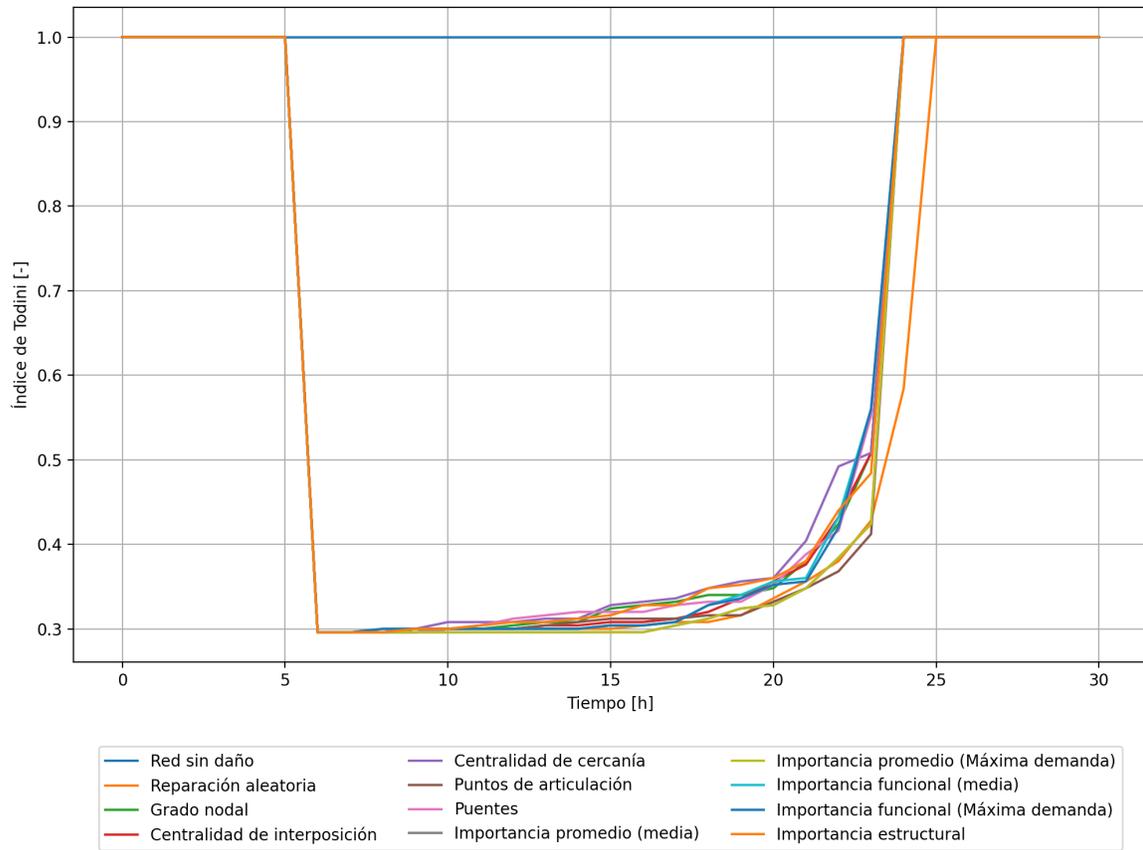


Figura 4.9: Índice de Tordini “Red48”. Fuente: elaboración propia.

En figuras anteriores, se puede observar que la recuperación de las métricas no es lo suficientemente sensible a los planes de reparación para seleccionar uno a partir de un análisis visual.

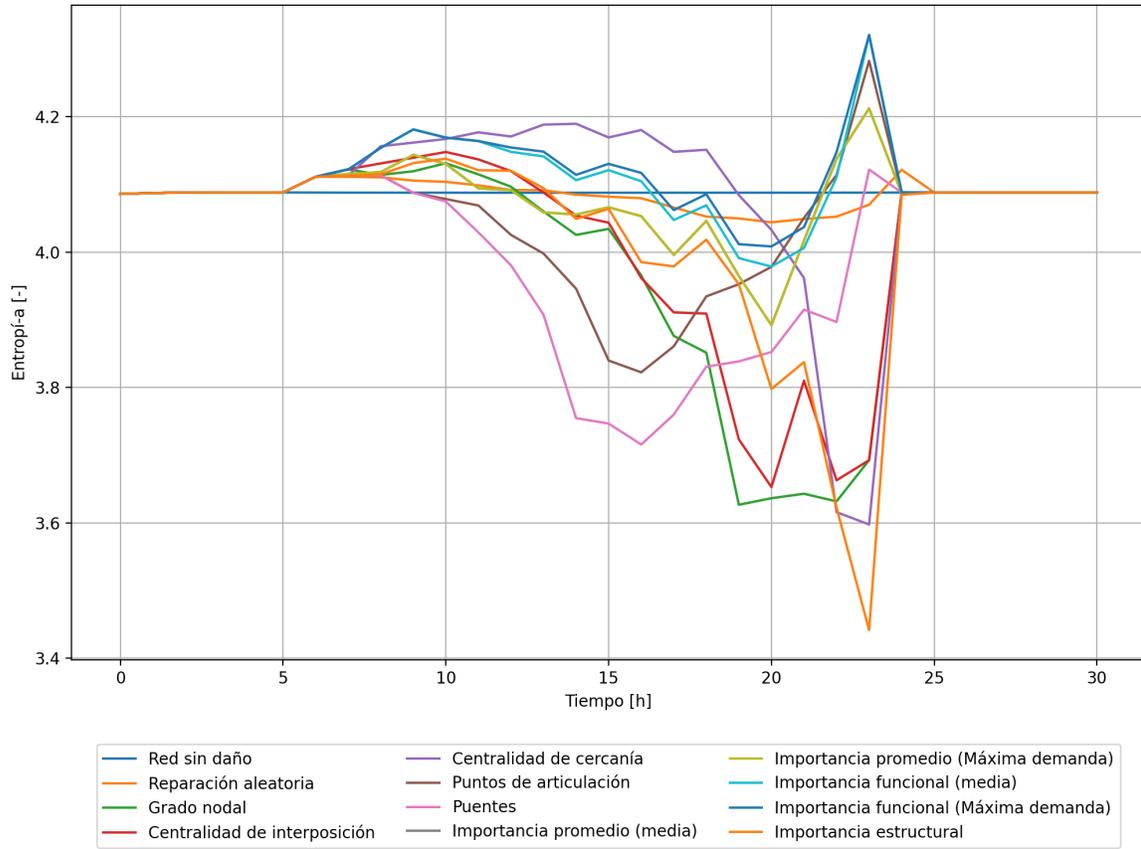


Figura 4.10: Entropía de la red “Red48”. Fuente: elaboración propia.

En el caso de la entropía, su comportamiento difiere del de las demás métricas y puede llevar a un análisis equivocado, ya que según su definición, un aumento de la entropía significa un aumento de la redundancia, esto a pesar de que la red que a pesar presente fugas y/o desconexiones y que todas las demás métricas muestren una pérdida de funcionalidad.

4.1.3. Resiliencia y rapidez

La Tabla 4.1 contiene la cantidad de horas transcurridas desde el primer sismo hasta la recuperación del funcionamiento normal de cada métrica con cada orden de reparación. En la tabla, se denomina Pmin al índice de presión mínima, WSA a la disponibilidad del servicio, Preq al índice de presión requerida.

Tabla 4.1: Tiempos de recuperación del funcionamiento normal con diferentes órdenes de reparación “Red48”, [horas]. Fuente: elaboración propia.

Orden de reparación\Métrica	Pmin	WSA	Todini	Preq	Entropía
Reparación aleatoria	23	24	25	24	25
Puntos de articulación	23	24	24	24	25
Puentes	22	23	24	23	24
Importancia promedio (media)	22	23	24	23	25
Importancia prom. (demanda máx.)	22	23	24	23	25
Importancia funcional (media)	21	23	24	23	25
Importancia fun. (demanda máx.)	21	23	24	23	25
Importancia estructural	22	23	24	23	25
Grado nodal	22	24	24	24	24
Centralidad de interposición	22	24	24	24	24
Centralidad de cercanía	21	23	24	23	25

Tal como se visualiza en las figuras anteriores, la rapidez en la reparación no tiene diferencias significativas al cambiar el orden de reparación.

Al integrar las curvas de reparación anteriores, se obtiene la resiliencia para cada métrica según cada orden de reparación. Luego, de la resiliencia obtenida se deriva la resiliencia normalizada, la cual se ilustra en las Figuras 4.11 y 4.12 para las *toy networks* “Red48” y “Red20”, respectivamente. Cada figura se compone de 5 grupos de barras independientes entre si. Cada grupo corresponde a una métrica. Las barras en cada grupo corresponden a la resiliencia normalizada con cada orden de reparación.

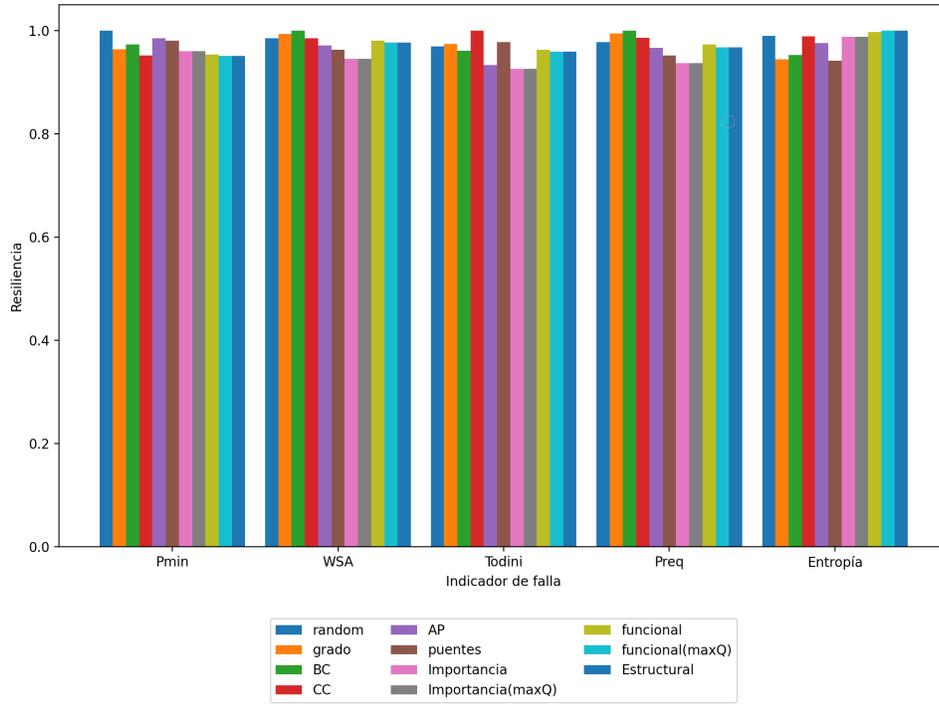


Figura 4.11: Resumen análisis de resiliencia normalizada “Red48”. Fuente: elaboración propia.

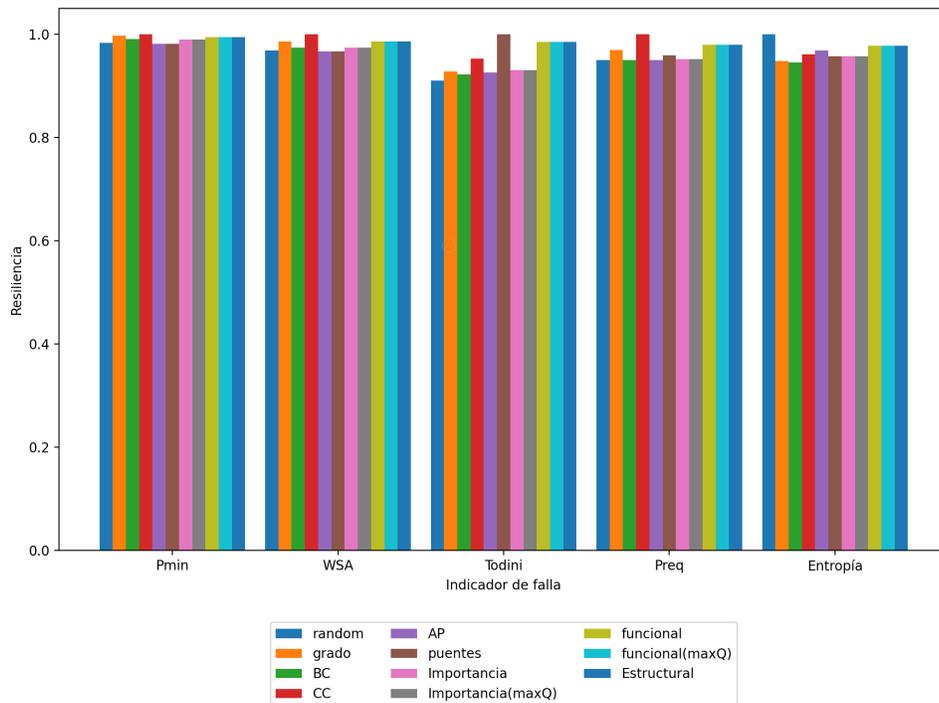


Figura 4.12: Resumen análisis de resiliencia normalizada “Red20”. Fuente: elaboración propia.

No existe ningún orden de reparación que muestre maximizar consistentemente, además diferencia en resiliencia no es superior al 10% en ningún caso. Tampoco hay métricas que sean consistentemente deficientes como para ser descartadas.

Para resaltar la diferencia entre las resiliencias obtenidas se calcula la resiliencia relativa, la cual se ilustra en las Figuras 4.13 y 4.14 para las *toy networks* “Red48” y “Red20”, respectivamente.

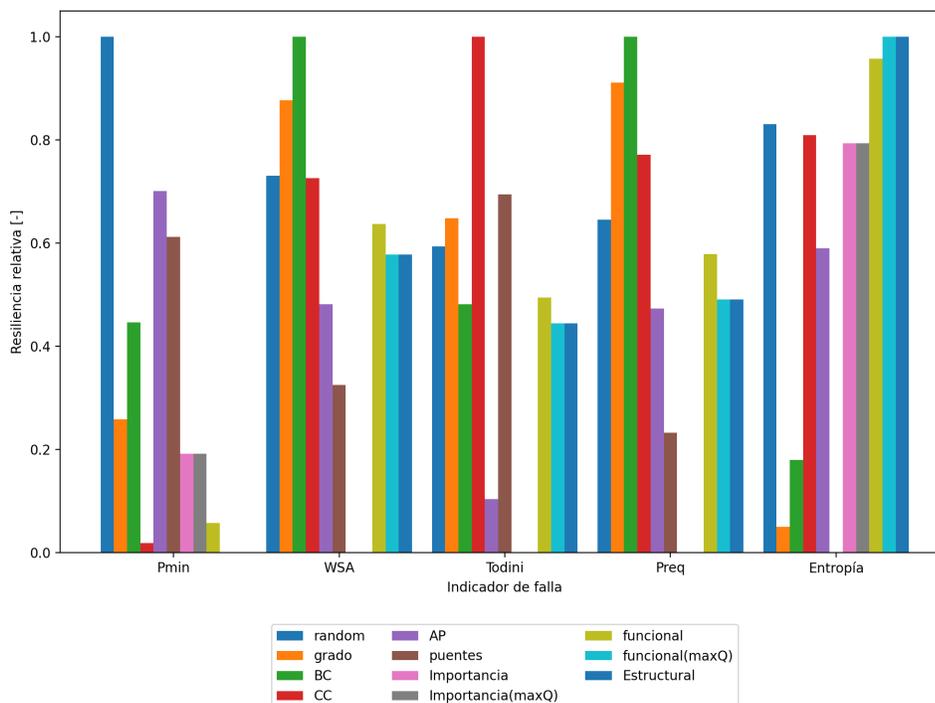


Figura 4.13: Resumen análisis de resiliencia relativa “Red48”. Fuente: elaboración propia.

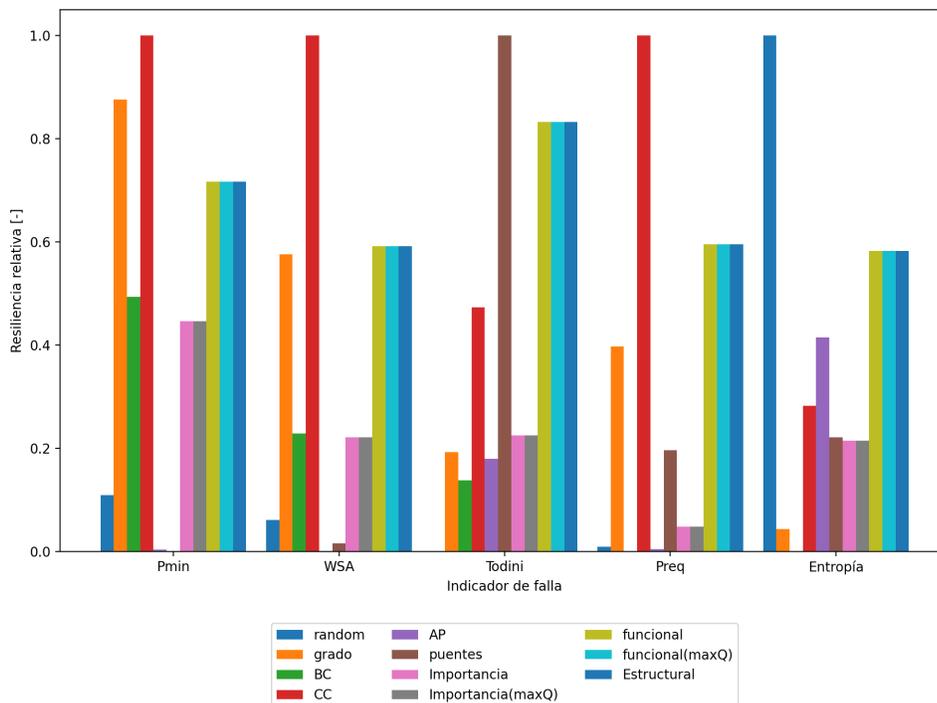


Figura 4.14: Resumen análisis de resiliencia relativa “Red20”. Fuente: elaboración propia.

La resiliencia se define como el área bajo la curva de reparación hasta que el valor de la métrica en reparación sea igual al de la métrica en la situación sin daño. Dado el comportamiento errático de la entropía en los escenarios de reparación, teniendo en varias ocasiones valores en reparación mayores al normal, se considera incongruente el cálculo de la resiliencia para esta métrica,

4.2. Sensorización

4.2.1. Presión umbral y cobertura

La matriz de restos de presiones resultante para la *toy network* de 20 uniones, Red 20, se presenta en las Tablas 4.2 y 4.3. A pesar de que las fugas tienen un área equivalente al 5% del área característica de la unión, el cambio en la presión es pequeño. Lo que indica que la robustez de la red es alta.

Tabla 4.2: Matriz de restos de presiones Red20, [mca]. Fuente: elaboración propia.

Nodos	Escenarios									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nodo_1_1	0,0412	0,0227	0,0165	0,0136	0,0148	0,0238	0,0164	0,0140	0,0135	0,0142
nodo_1_2	0,0227	0,0275	0,0177	0,0139	0,0150	0,0183	0,0164	0,0142	0,0137	0,0143
nodo_1_3	0,0173	0,0180	0,0245	0,0157	0,0161	0,0156	0,0143	0,0149	0,0146	0,0150
nodo_1_4	0,0150	0,0146	0,0157	0,0213	0,0187	0,0140	0,0127	0,0137	0,0153	0,0163
nodo_1_5	0,0150	0,0146	0,0155	0,0187	0,0382	0,0141	0,0127	0,0137	0,0158	0,0220
nodo_2_1	0,0238	0,0181	0,0153	0,0133	0,0146	0,0289	0,0165	0,0139	0,0134	0,0141
nodo_2_2	0,0182	0,0170	0,0151	0,0132	0,0145	0,0176	0,0179	0,0139	0,0133	0,0139
nodo_2_3	0,0165	0,0161	0,0161	0,0146	0,0157	0,0154	0,0142	0,0184	0,0146	0,0149
nodo_2_4	0,0152	0,0148	0,0154	0,0162	0,0181	0,0143	0,0129	0,0142	0,0197	0,0172
nodo_2_5	0,0150	0,0146	0,0152	0,0163	0,0224	0,0141	0,0128	0,0138	0,0164	0,0273
nodo_3_1	0,0194	0,0166	0,0149	0,0132	0,0146	0,0208	0,0155	0,0138	0,0134	0,0141
nodo_3_2	0,0177	0,0161	0,0148	0,0132	0,0146	0,0176	0,0153	0,0137	0,0134	0,0141
nodo_3_3	0,0154	0,0146	0,0143	0,0132	0,0147	0,0148	0,0132	0,0136	0,0135	0,0142
nodo_3_4	0,0151	0,0145	0,0145	0,0142	0,0163	0,0142	0,0128	0,0136	0,0151	0,0162
nodo_3_5	0,0150	0,0145	0,0146	0,0145	0,0177	0,0141	0,0128	0,0136	0,0152	0,0190
nodo_4_1	0,0185	0,0162	0,0148	0,0132	0,0146	0,0192	0,0152	0,0137	0,0134	0,0141
nodo_4_2	0,0175	0,0158	0,0147	0,0132	0,0146	0,0175	0,0148	0,0137	0,0134	0,0142
nodo_4_3	0,0156	0,0147	0,0143	0,0132	0,0147	0,0150	0,0133	0,0135	0,0135	0,0143
nodo_4_4	0,0146	0,0140	0,0139	0,0132	0,0148	0,0139	0,0125	0,0130	0,0135	0,0148
nodo_4_5	0,0148	0,0142	0,0142	0,0139	0,0163	0,0140	0,0126	0,0133	0,0144	0,0169

Tabla 4.3: Matriz de restos de presiones Red20, [mca] (continuación). Fuente: elaboración propia.

Nodos	Escenarios									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
nodo_1_1	0,0182	0,0149	0,0119	0,0125	0,0136	0,0169	0,0145	0,0124	0,0116	0,0134
nodo_1_2	0,0163	0,0144	0,0118	0,0125	0,0136	0,0158	0,0140	0,0122	0,0116	0,0134
nodo_1_3	0,0149	0,0137	0,0118	0,0128	0,0140	0,0149	0,0136	0,0122	0,0116	0,0137
nodo_1_4	0,0137	0,0126	0,0113	0,0128	0,0144	0,0138	0,0128	0,0118	0,0116	0,0137
nodo_1_5	0,0138	0,0127	0,0116	0,0136	0,0164	0,0140	0,0130	0,0121	0,0122	0,0150
nodo_2_1	0,0199	0,0153	0,0120	0,0125	0,0136	0,0179	0,0150	0,0125	0,0116	0,0134
nodo_2_2	0,0163	0,0144	0,0118	0,0123	0,0133	0,0158	0,0140	0,0122	0,0114	0,0131
nodo_2_3	0,0149	0,0137	0,0122	0,0130	0,0140	0,0150	0,0137	0,0124	0,0119	0,0137
nodo_2_4	0,0140	0,0130	0,0119	0,0142	0,0157	0,0143	0,0133	0,0124	0,0125	0,0150
nodo_2_5	0,0139	0,0129	0,0118	0,0143	0,0184	0,0142	0,0132	0,0124	0,0127	0,0162
nodo_3_1	0,0289	0,0175	0,0125	0,0127	0,0137	0,0231	0,0174	0,0133	0,0119	0,0136
nodo_3_2	0,0189	0,0201	0,0127	0,0127	0,0137	0,0191	0,0171	0,0133	0,0119	0,0136
nodo_3_3	0,0148	0,0138	0,0146	0,0130	0,0139	0,0150	0,0139	0,0131	0,0120	0,0137
nodo_3_4	0,0140	0,0130	0,0122	0,0182	0,0164	0,0143	0,0133	0,0129	0,0139	0,0164
nodo_3_5	0,0139	0,0129	0,0119	0,0153	0,0263	0,0142	0,0133	0,0128	0,0141	0,0205
nodo_4_1	0,0241	0,0175	0,0126	0,0128	0,0138	0,0394	0,0214	0,0143	0,0121	0,0137
nodo_4_2	0,0190	0,0174	0,0127	0,0128	0,0138	0,0223	0,0257	0,0153	0,0124	0,0138
nodo_4_3	0,0153	0,0142	0,0129	0,0132	0,0142	0,0162	0,0161	0,0207	0,0135	0,0145
nodo_4_4	0,0138	0,0127	0,0118	0,0141	0,0157	0,0141	0,0133	0,0132	0,0185	0,0170
nodo_4_5	0,0139	0,0128	0,0119	0,0147	0,0212	0,0141	0,0133	0,0130	0,0162	0,0349

En la Figura 4.15, se muestra el comportamiento de la cobertura total máxima con respecto a la presión umbral, para cada una de las *toy networks*.

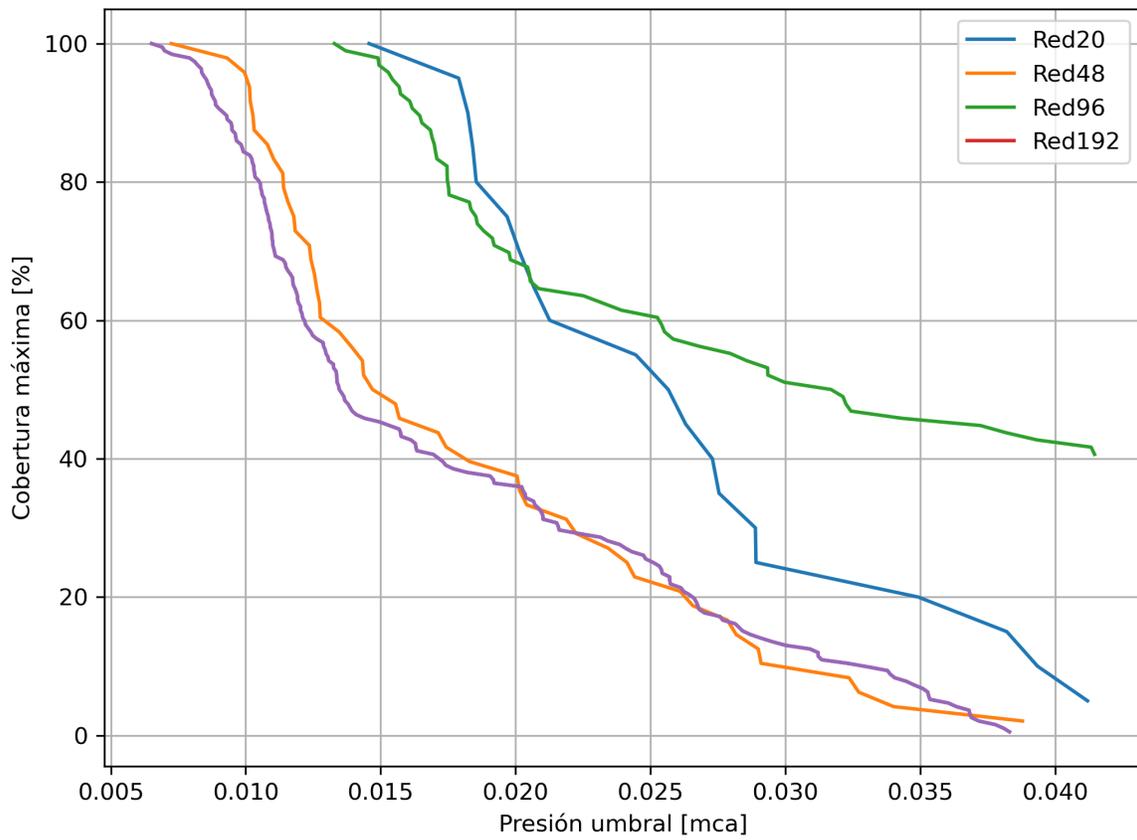


Figura 4.15: Cobertura total máxima respecto al umbral de presión. Fuente: elaboración propia.

Estableciendo la cobertura máxima detectable en un 90 %, se obtiene una presión umbral de 0,0182 mca, se obtiene la matriz de fallas detectables representada en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Matriz de detección Red20. Fuente: elaboración propia.

Nodos	Escenarios																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
nodo_1_1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
nodo_1_2	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
nodo_1_3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
nodo_1_4	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
nodo_1_5	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
nodo_2_1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
nodo_2_2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
nodo_2_3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
nodo_2_4	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
nodo_2_5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
nodo_3_1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
nodo_3_2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
nodo_3_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
nodo_3_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
nodo_3_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
nodo_4_1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
nodo_4_2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
nodo_4_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
nodo_4_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
nodo_4_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1

De la matriz de fallas detectables, se observa que las fugas son detectables en la misma unión donde se produce y en un vecindario muy acotado alrededor de esta.

4.2.2. Tiempos de cómputo

La primera etapa de la metodología se aplica a las *toy networks* de la Figura 4.16, “Red48”, “Red96” y “Red192”, variando la cantidad de iteraciones máximas (generaciones del algoritmo) y tamaño de la población (cantidad de individuos por generación).

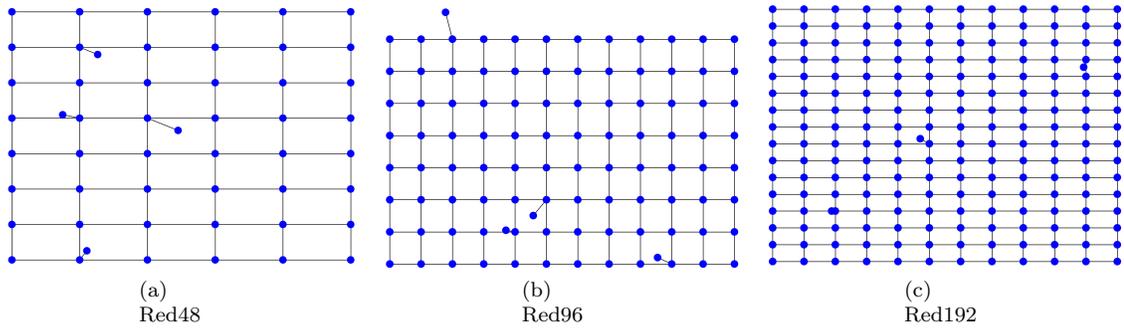


Figura 4.16: Redes de prueba tiempo de cómputo. Fuente: elaboración propia.

Analizando el comportamiento de los tiempos de resolución de cada ejecución del código, se propone un modelo para el tiempo de ejecución con la siguiente ecuación:

$$t = \alpha N^a P^b I^c \quad (4.1)$$

Con,

α : constante.

N: número de nodos de la red.

P: tamaño de la población del algoritmo genético.

I: iteraciones del algoritmo genético.

a,b,c: ajuste exponencial.

Realizando los ajustes a los tiempos de cómputo de las simulaciones realizadas se obtienen los exponentes explicitados en la ecuación 4.2:

$$t = \alpha N^{3,529} P I \quad (4.2)$$

La comparación de tiempos de simulación y teóricos se muestran en la tabla 4.5, además del tiempo estimado para una red de 600 nodos, 1000 generaciones y población de tamaño de 1500 individuos.

Tabla 4.5: Tiempos de cómputo de simulación y teóricos. Fuente: elaboración propia.

Cantidad de nodos	Tamaño de la población	Iteraciones máximas	Tiempo simulación	Tiempo teórico	error [%]
48	480	100	5,5 minutos	5,2 minutos	3.28
48	480	50	3 minutos	2,6 minutos	12.93
48	240	50	1,5 minutos	1,3 minutos	11.20
48	2400	500	2,16 horas	2,15 minutos	0.00
48	480	10	0,5 minutos	0,5 minutos	4.75
48	2400	10	2,75 minutos	2,6 minutos	2.68
96	960	10	10,25 minutos	12 minutos	17.74
96	4800	50	4,75 horas	5 horas	5.48
96	4800	100	9,1 horas	10 horas	10.84
192	1920	10	4,1 horas	4,75 horas	13.32
192	1920	25	9,9 horas	11,75 horas	17.90
192	4800	25	29,8 horas	29,1 horas	2.44
600	1500	1000	-	2,3 años	-

El algoritmo muestra ser muy rápido en redes pequeñas, pero al aumentar el número de nodos, el tiempo aumenta exponencialmente.

Cabe señalar que los tiempos de cómputo contemplan la solución para sólo un set de sensores, por lo que se debe ejecutar tantas veces como sets de sensores se quieran optimizar. El algoritmo está preparado para funcionar con procesamiento multinúcleo, por lo que si se dispone de una cantidad de núcleos mayor o igual a la cantidad de sets, el tiempo no aumenta.

4.2.3. Optimización de la sensorización

Aplicando la primera etapa del algoritmo de optimización de la sensorización, optimización de la localización, a la *toy networks* “Red20” se obtienen las configuraciones para distinta cantidad de sensores. La ilustración gráfica de estos resultados, se encuentra en las figuras del Apéndice A.2.

En la Figura 4.17 se presenta la cobertura obtenida para cada set de sensores obtenida para la *toy network* “Red20”.

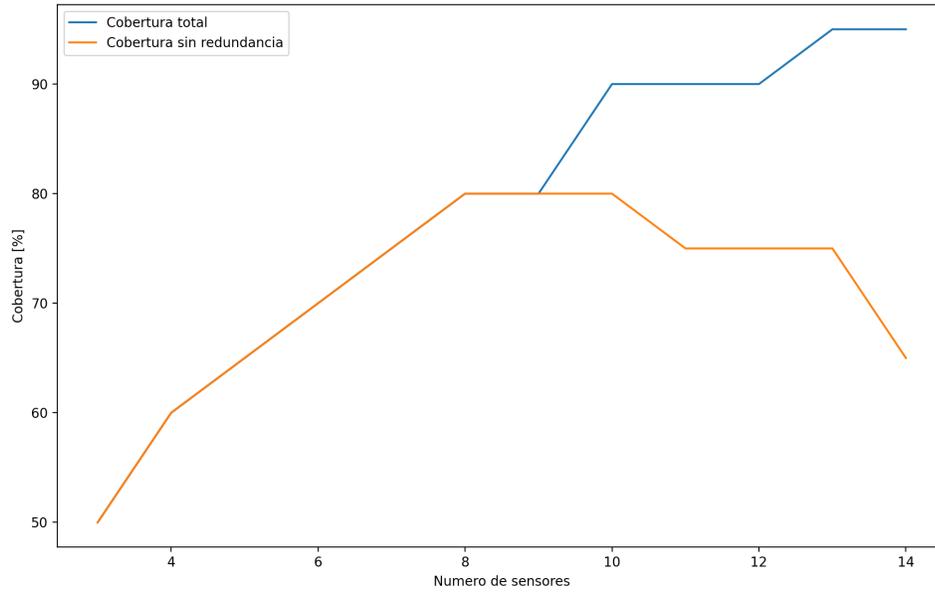


Figura 4.17: Resultados algoritmo genético. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 4.17 se aprecia que la cobertura total es siempre creciente con la cantidad de sensores, mientras que la cobertura sin redundancia alcanza un pico y luego decae. Esto, por el solapamiento entre las zonas de detección de los sensores. La curva presenta irregularidades que se pueden explicar por la baja cantidad de iteraciones empleada, probablemente atribuible a que el algoritmo alcanzó el máximo de iteraciones antes de encontrar la solución óptima para algunos sets.

Al aplicar el análisis costo beneficio a los resultados anteriores se obtiene gráfico de costo en función del número de sensores presentado en la Figura 4.18.

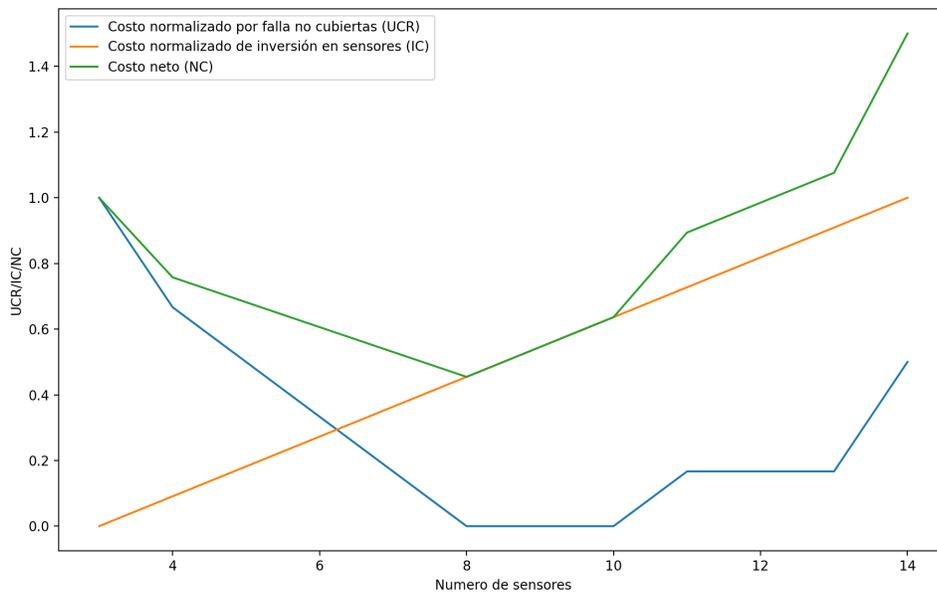


Figura 4.18: Resultados costo-beneficio. Fuente: elaboración propia.

Identificando el mínimo de la curva de costo neto, se obtiene la configuración óptima de sensores y sus respectivas coberturas:

- Número de sensores: 8.
- Cobertura total: 80 %.
- Cobertura sin redundancia: 80 %.

En la Figura 4.19 se representa la localización de los sensores.

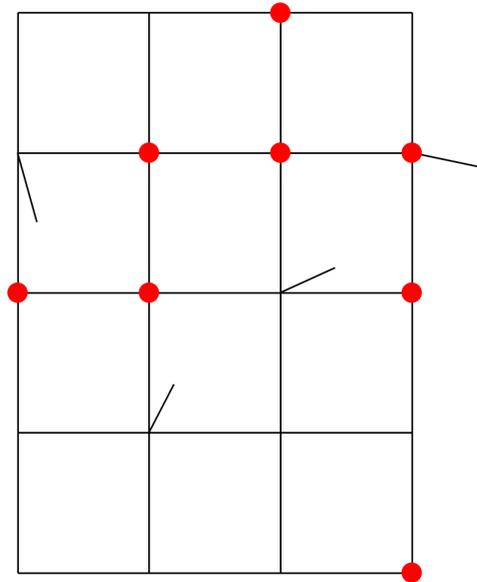


Figura 4.19: Configuración de sensorización óptima “Red20”. Fuente: elaboración propia.

La configuración óptima propuesta, presenta un 40 % de sus uniones sensorizadas y otorga un 80 % de cobertura. Lo cual a priori sería ineficiente, pero esto se explica por la baja magnitud de los restos de presiones y que cada escenario de falla es detectable por una baja cantidad ubicaciones.

Capítulo 5

Conclusiones

Respecto a la confiabilidad de la red, se logró implementar las siguientes metodologías:

- Métricas de criticidad de importancia estructural, funcional y promedio.
- Simulación de daño en la red dado un escenario de amenaza sísmica.
- Simulación hidráulica, implementando distintos órdenes de reparación basados en métricas de criticidad.
- Análisis de rapidez y resiliencia en la reparación.

El código de *Python* desarrollado para esta memoria incluye ambas metodologías propuestas y está preparado para funcionar con cualquier red, siempre y cuando este disponible su topología, sus coordenadas y patrones de demanda.

Sobre las métricas de criticidad propuestas por Wang et al. (2019), además de no resaltar como orden de reparación, tienen un tiempo mayor de computo al necesitar un análisis hidráulico y topológico iterativo sobre la red. Debido a la homogeneidad de las redes analizadas, en términos de caudales y forma, la importancia funcional solo logra identificar las fuentes de agua, otorgando información poco relevante del resto de la red. Por su parte, la importancia estructural, tal como anunciaba su definición, muestra ser muy similar a la centralidad interposición.

Los puentes y puntos de articulación son análogos, por lo que resulta redundante la utilización de ambas características. Si bien estas características nominales de los elementos no fueron significativas en las redes de prueba, su definición es muy poderosa y, sin duda los elementos que poseen estas características son de vital importancia en las redes. El problema con estas, es su carácter cualitativo, que impide priorizar entre elementos que cumplen su condición.

Respecto a la resiliencia, las pruebas realizadas en las *toy networks* no son concluyentes en como afectan los planes de reparación en la recuperación del servicio. Pero esto se puede deber a varios aspectos, entre ellos:

- Tamaño de la red: las redes son pequeñas términos de distancia, lo que se traduce en una aceleración del suelo similar para cada punto de la red y, por lo tanto, una probabilidad de falla similar.
- Forma de la red: la forma de cuadrícula de las redes otorga alta redundancia. Gracias a esto, cualquier reparación se traduce en un aumento de funcionalidad similar.
- Distribución del diámetro de las tuberías: el diámetro de las tuberías aumenta mientras más al centro de la red se encuentran.

Dado lo anterior, podría resultar dilucidador el ejercicio de escalar este estudio a redes más grandes y con diferentes formas y distribuciones; incorporando también la materialidad de los elementos y el deterioro de estos. Además, sería útil estudiar como afecta un plan de protección de elementos ligado a la criticidad, para así disminuir la probabilidad de falla y evaluar consecuencias en la resiliencia.

Es importante reiterar que la entropía resultó incongruente con el cálculo de la resiliencia y, por lo tanto, irrelevante como métrica de desempeño en la recuperación del servicio. Dada su definición ligada a la redundancia, se recomienda el uso de esta métrica para comparar la confiabilidad de distintas configuraciones de una red, es decir, para planificar la ampliación de las redes.

Otro aspecto a destacar es que todas las métricas de criticidad analizadas derivan de un estado sin daño, por lo que se deja planteado para próximos estudios, diseñar e implementar métricas que esté ligada con la pérdida de funcionalidad del nodo o la red respecto a una fuga; por ejemplo, considerando la matriz de restos de presiones utilizada en la sección de sensorización. Así se podría ligar el orden de reparación con la sensibilidad al daño.

Por su parte, la metodología integrada de optimización de la sensorización, también se ha implementado completamente y es aplicable a cualquier red pequeña de la cual se tenga información morfológica y sus respectivos patrones de demanda.

Por simplicidad el análisis costo beneficio se realizó con variables normalizadas, lo que permitió olvidarse del costo de los sensores y alejar la mirada de que lo que significa en términos reales el costo de fallas no cubiertas. Si bien el costo de los sensores podría ser trivial de obtener a través de una cotización con algún distribuidor, el costo por fallas no cubiertas no es tan simple.

Para obtener una mejor estimación del costo por fallas no cubiertas, se sugiere incorporar un modelo robusto, que considere varias amenazas, la materialidad de las tuberías, el deterioro de los elementos y, por sobretodo, un modelo de fuga que sea menos arbitrario, por ejemplo, incorporando historiales de fuga. Con esto se podría estimar probabilísticamente el caudal perdido y las multas asociadas a este.

Respecto al algoritmo genético simple que optimiza la localización, este tiene un tiempo de ejecución que escala exponencialmente con la cantidad de nodos de la red. Esto pone una limitante ineludible frente a redes con el orden de los cientos de nodos. El tiempo también

es proporcional a la cantidad de iteraciones máximas. Este número está relacionado con la cantidad mínima de iteraciones que se necesitan para obtener una solución aceptable de manera consistente. Una alternativa, que asegura la reducción del número de iteraciones, es implementar un algoritmo genético mejorado como lo es el algoritmo genético desordenado rápido. Pero esto no asegura la reducción del tiempo, ya que esta consideración haría que cada iteración de algoritmo lleve más tiempo. Otra alternativa que se deja planteada para futuros trabajos, es la utilización de filtros previos al algoritmo genético para así disminuir la cantidad de uniones candidatas a ser sensorizadas, como la metodología propuesta por Soldevila et al. (2018).

Es relevante notar que la solución analítica del problema de la localización de sensores es prácticamente imposible debido a que el tiempo de ejecución escala en el orden de n^n con el número de nodos, por lo que se considera que puede ser útil el mejoramiento y desarrollo meta-heurísticas que entregue soluciones cercanas al óptimo analítico global, en caso de que exista.

Bibliografía

- Anwar, G. A., Dong, Y., y Zhai, C. (2019). Performance-based probabilistic framework for seismic risk, resilience, and sustainability assessment of reinforced concrete structures. *Advances in Structural Engineering*, 23(7), 1454–1472. doi: 10.1177/1369433219895363
- Awumah, K., Goulter, I., y Bhatt, S. K. (1990). Assessment of reliability in water distribution networks using entropy based measures. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 4(4), 309–320. doi: 10.1007/bf01544084
- Cheng, W., Chen, Y., y Xu, G. (2020). Optimizing sensor placement and quantity for pipe burst detection in a water distribution network. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146, 4020088. doi: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001298
- Datta, S., y Sarkar, S. (2016). A review on different pipeline fault detection methods. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 41, 97-106. doi: 10.1016/j.jlp.2016.03.010
- Fernández, G. (2021). Diseño de una metodología general para la identificación de elementos críticos en redes de distribución de agua potable [Memoria para optar al título de Ingeniero Civil]. *Universidad de Chile*.
- Garvs, I. (2020). Desarrollo de curvas de fragilidad para sistemas de distribución de agua en Chile [Memoria para optar al título de Ingeniero Civil]. *Universidad de Chile*.
- Gheisi, A., Forsyth, M., y Naser, G. (2016). Water distribution systems reliability: A review of research literature. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142, 4016047. doi: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000690
- Gheisi, A., y Naser, G. (2014). Water distribution system reliability under simultaneous multicomponent failure scenario. *Journal - American Water Works Association*, 106, E319–E327. doi: 10.5942/jawwa.2014.106.0075
- Instituto Nacional de Normalización. (2000). *Nch2485 of2000 instalaciones domiciliarias de agua potable - diseño, cálculo y requisitos de las redes interiores*. <https://www.inn.cl/>.
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 31000 Gestión del riesgo - Directrices*. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:31000:ed-2:v1:es>.
- Klise, K., Hart, D., Moriarty, D., Bynum, M., Murray, R., Burkhardt, J., y Haxton, T. (2017). *Water network tool for resilience (wntr) user manual* (Inf. Téc.). U.S. Environmental Protection Agency.
- Lee, S., Choi, M., Lee, H. S., y Park, M. (2020). Bayesian network-based seismic damage estimation for power and potable water supply systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 197, 106796. doi: 10.1016/j.ress.2020.106796
- Mukherjee, R., Diwekar, U. M., y Vaseashta, A. (2017). Optimal sensor placement with mi-

- tigation strategy for water network systems under uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*, 103, 91-102. doi: 10.1016/j.compchemeng.2017.03.014
- Nejjari, F., Sarrate, R., y Blesa, J. (2015). Optimal pressure sensor placement in water distribution networks minimizing leak location uncertainty. *Procedia Engineering*, 119, 953-962. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.979
- Quintiliani, C., Vertommen, I., Laarhoven, K. V., Vliet, J. V. D., y Thienen, P. V. (2020). Optimal pressure sensor locations for leak detection in a dutch water distribution network. *Environmental Sciences Proceedings*, 2, 40. doi: 10.3390/environsciproc2020002040
- Singh, A., y Adachi, S. (2013). Bathtub curves and pipe prioritization based on failure rate. *Built Environment Project and Asset Management*, 3, 105-122. doi: 10.1108/bepam-11-2011-0027
- Sivanandam, S., y Deepa, S. (2007). *Introduction to Genetic Algorithms* (2008.^a ed.). Springer.
- Soldevila, A., Blesa, J., Tornil-Sin, S., Fernandez-Canti, R., y Puig, V. (2018, 1). Sensor placement for classifier-based leak localization in water distribution networks using hybrid feature selection. *Computers & Chemical Engineering*, 108, 152-162. doi: 10.1016/j.compchemeng.2017.09.002
- Steffelbauer, D. B., y Fuchs-Hanusch, D. (2016). Efficient sensor placement for leak localization considering uncertainties. *Water Resources Management*, 30, 5517-5533. doi: 10.1007/s11269-016-1504-6
- Sun, C., Parellada, B., Puig, V., y Cembrano, G. (2019). Leak localization in water distribution networks using pressure and data-driven classifier approach. *Water*, 12, 54. doi: 10.3390/w12010054
- Superintendencia de Servicios Sanitarios. (2019). *Informe de gestión del sector sanitario*.
- Todini, E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, 2(2), 115-122. doi: 10.1016/s1462-0758(00)00049-2
- Villez, K., Vanrolleghem, P. A., y Corominas, L. (2020). A general-purpose method for pareto optimal placement of flow rate and concentration sensors in networked systems – with application to wastewater treatment plants. *Computers & Chemical Engineering*, 139, 106880. doi: 10.1016/j.compchemeng.2020.106880
- Wagner, J. M., Shamir, U., y Marks, D. H. (1988). Water distribution reliability: Simulation methods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 114(3), 276-294. doi: 10.1061/(asce)0733-9496(1988)114:3(276)
- Wang, F., Zheng, X. Z., Li, N., y Shen, X. (2019). Systemic vulnerability assessment of urban water distribution networks considering failure scenario uncertainty. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 26, 100299. doi: 10.1016/j.ijcip.2019.05.002
- Wilson, R. (1996). *Introduction to Graph Theory (4th Edition)* (4.^a ed.). Addison Wesley.
- Zhao, M., Zhang, C., Liu, H., Fu, G., y Wang, Y. (2020). Optimal sensor placement for pipe burst detection in water distribution systems using cost-benefit analysis. *Journal of Hydroinformatics*, 22, 606-618. doi: 10.2166/hydro.2020.158

ANEXOS

Anexo A

Resultados adicionales

A.1. Resultados confiabilidad “Red20”

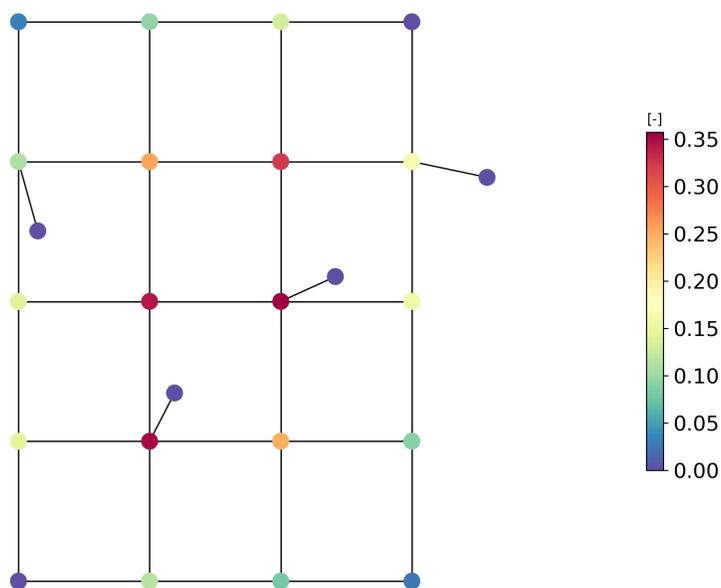


Figura A.1: Importancia estructural “Red20”. Fuente: elaboración propia.

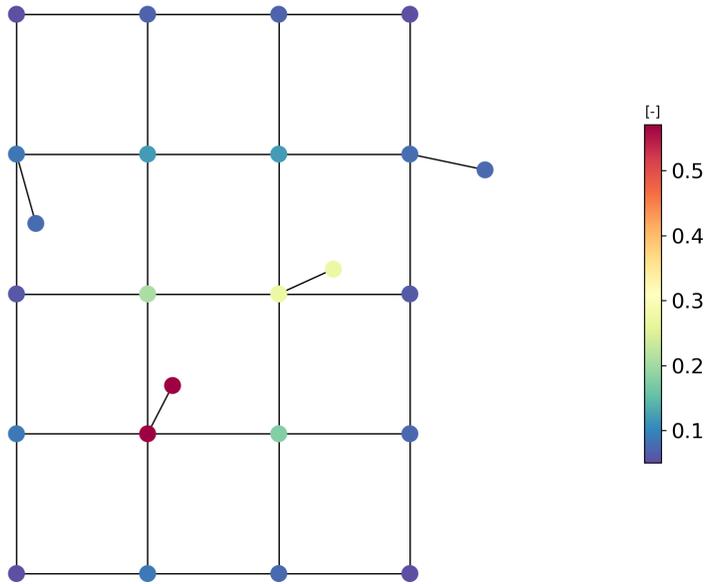


Figura A.2: Importancia funcional media “Red20”. Fuente: elaboración propia.

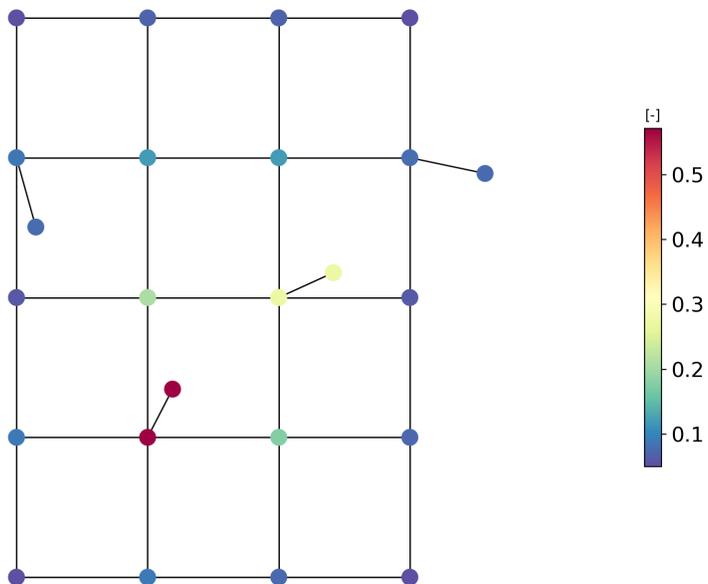


Figura A.3: Importancia funcional en demanda máxima “Red20”. Fuente: elaboración propia.

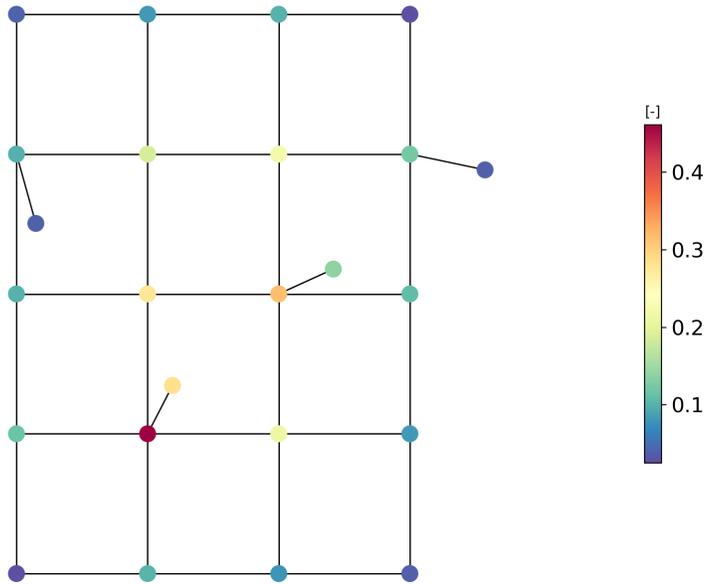


Figura A.4: Importancia promedio media “Red20”. Fuente: elaboración propia.

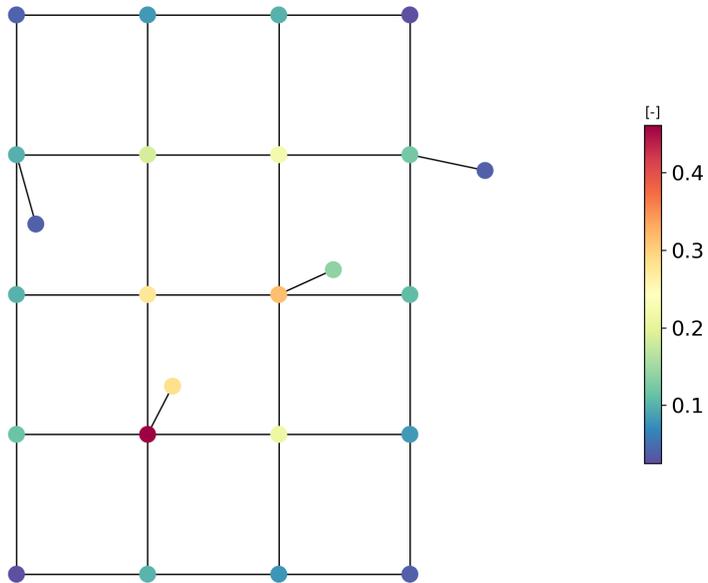


Figura A.5: Importancia promedio en demanda máxima “Red20”. Fuente: elaboración propia.

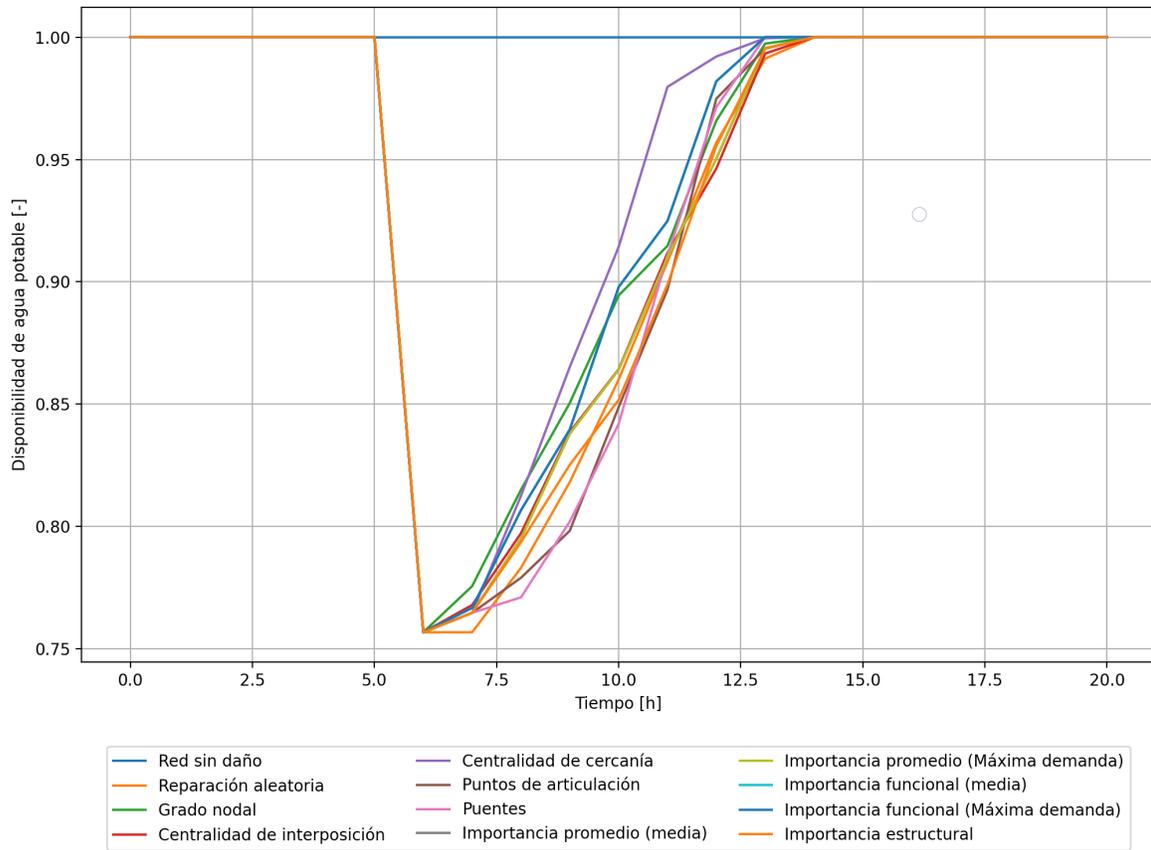


Figura A.6: Disponibilidad del servicio de agua potable “Red20”. Fuente: elaboración propia.

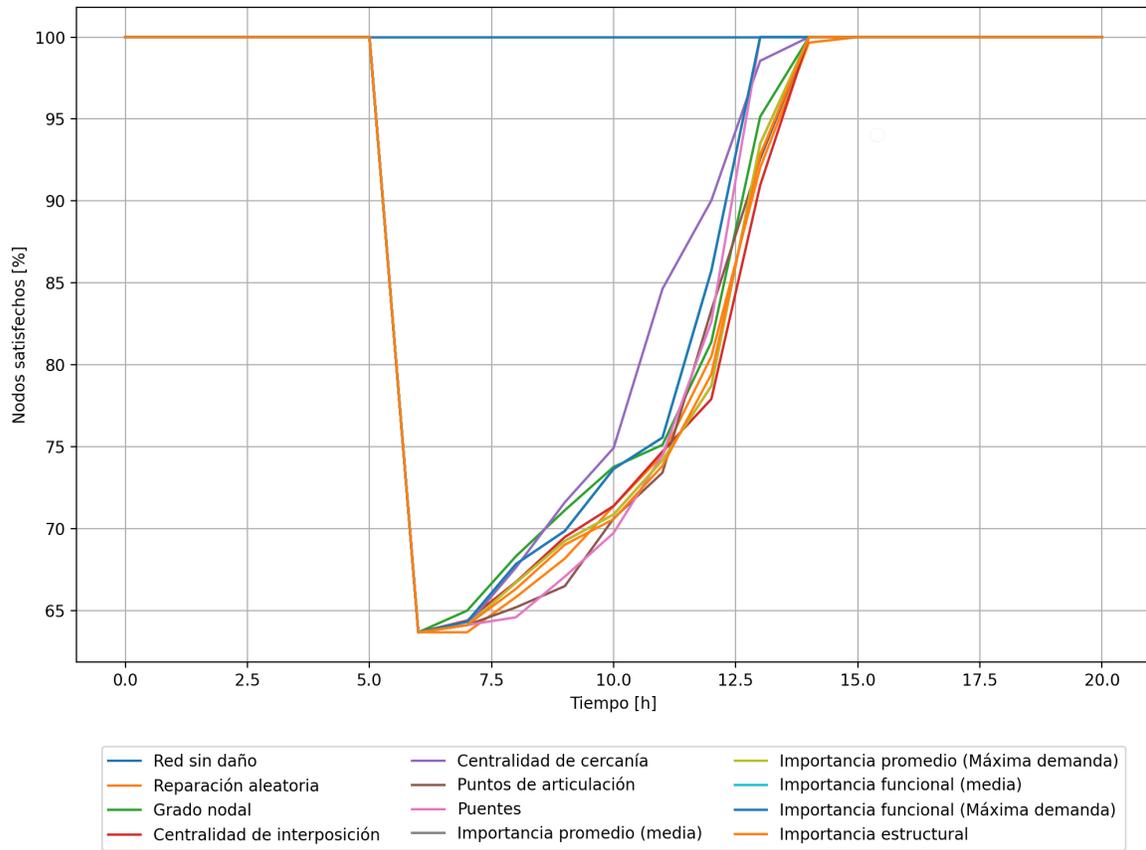


Figura A.7: Factor de cumplimiento de la presión requerida “Red20”. Fuente: elaboración propia.

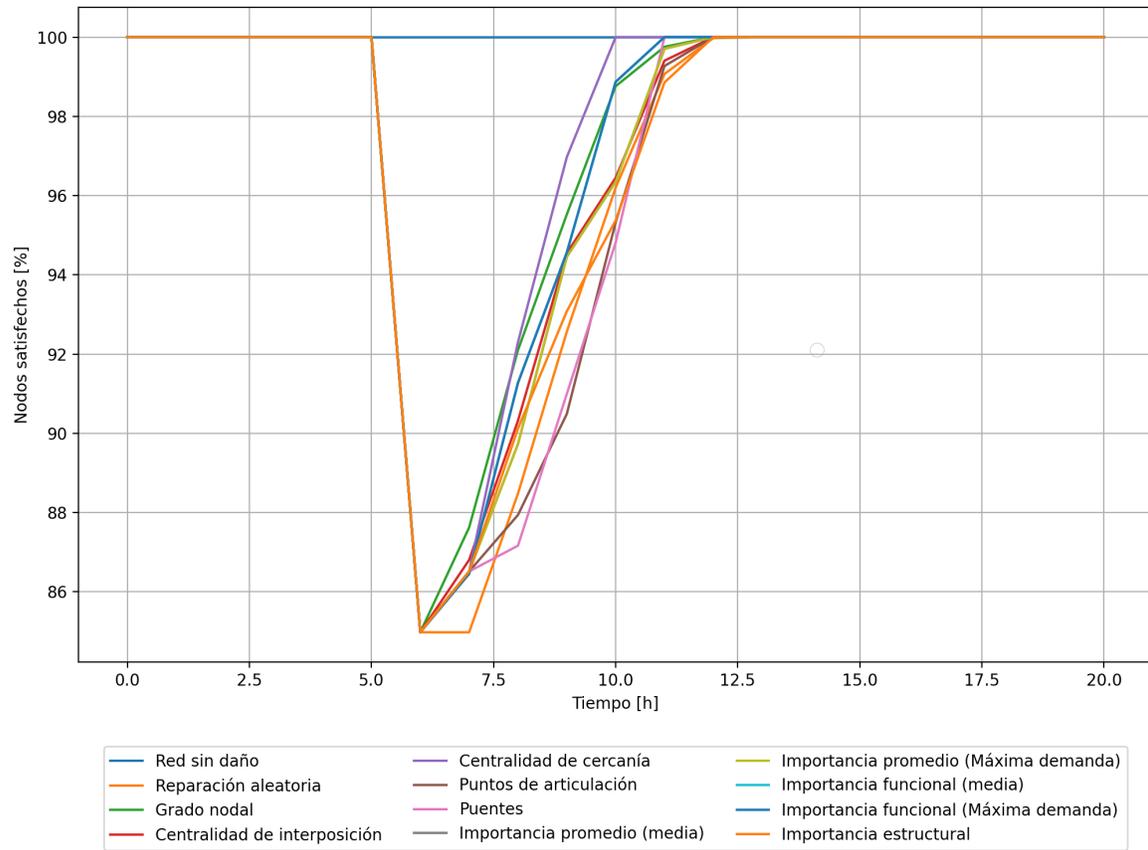


Figura A.8: Factor de cumplimiento de la presión mínima “Red20”. Fuente: elaboración propia.

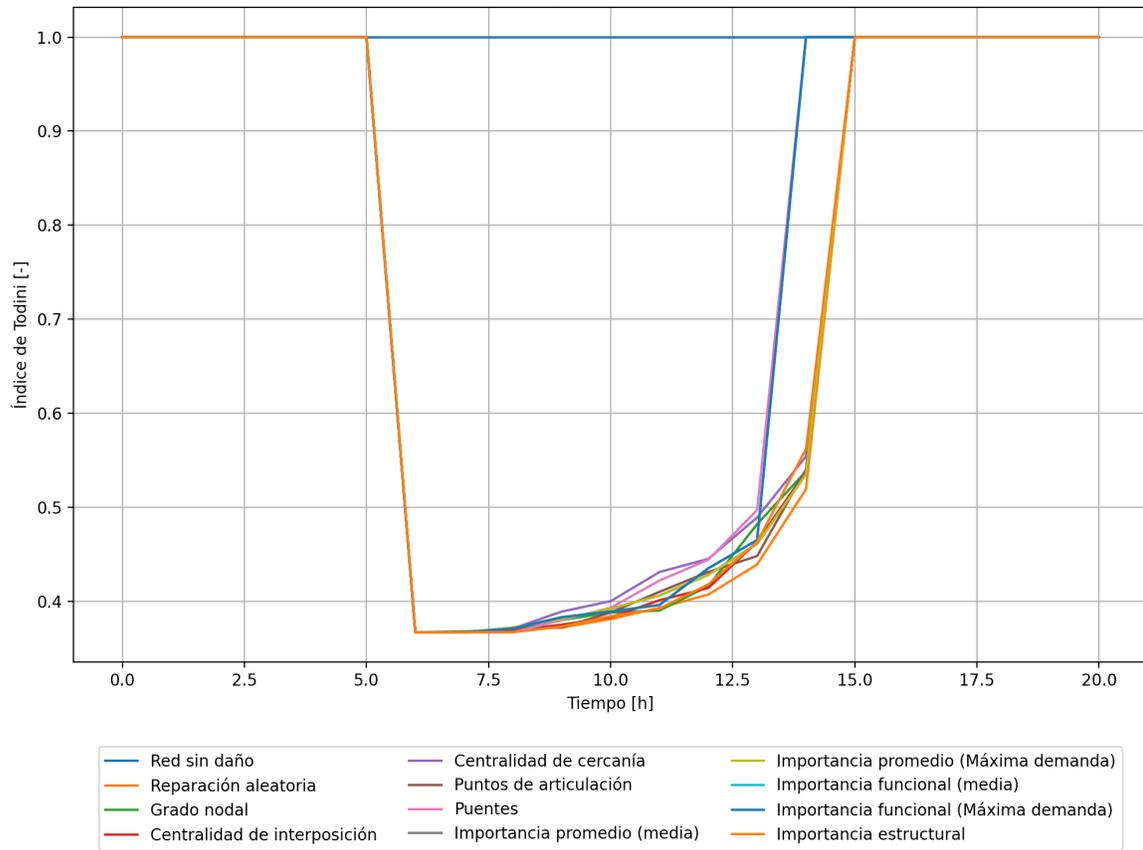


Figura A.9: Índice de Todini “Red20”. Fuente: elaboración propia.

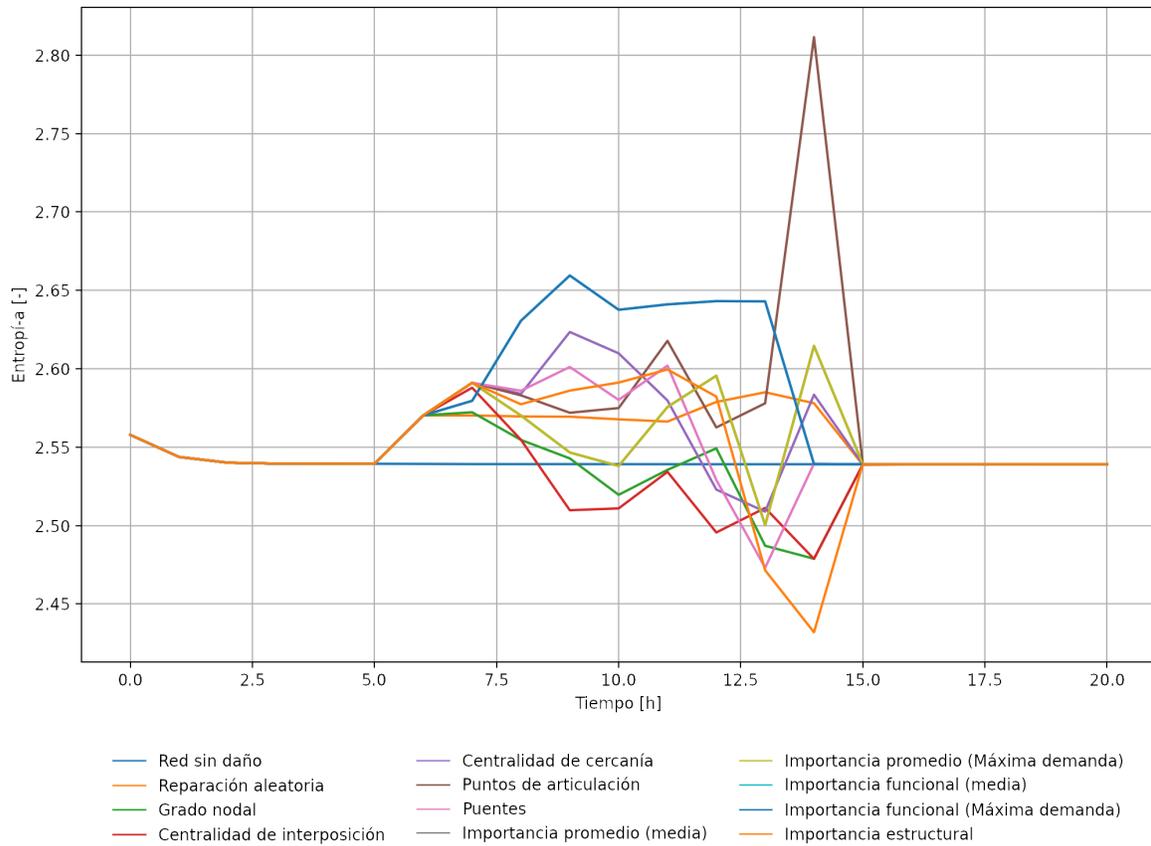


Figura A.10: Entropía de la red “Red20”. Fuente: elaboración propia.

A.2. Resultados sensorización “Red20”

A continuación se ilustran los resultados de la optimización de la localización de sensores para la *toy network* “Red20”, con su respectiva cobertura sin redundancia y total.

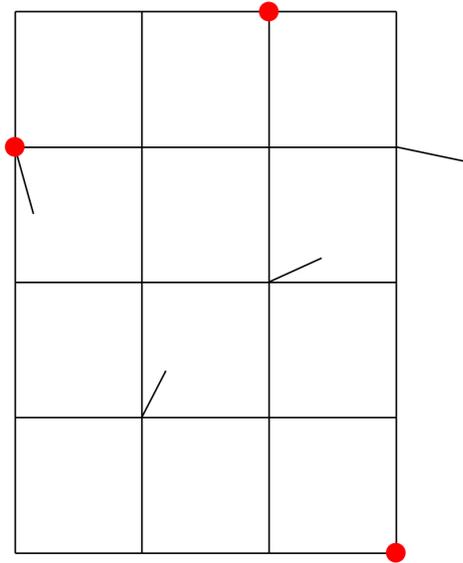


Figura A.11: Localización óptima de 3 sensores. Cobertura total 50% y cobertura sin redundancia 50%. Fuente: elaboración propia.

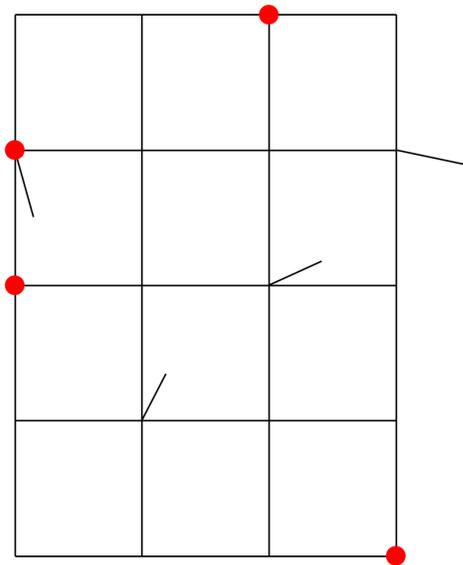


Figura A.12: Localización óptima de 4 sensores. Cobertura total 60% y cobertura sin redundancia 60%. Fuente: elaboración propia.

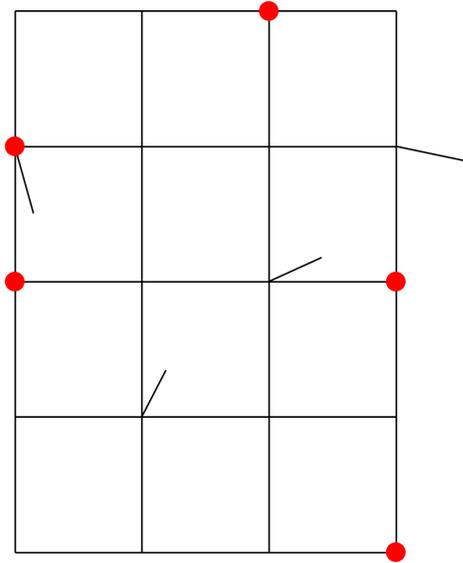


Figura A.13: Localización óptima de 5 sensores. Cobertura total 65% y cobertura sin redundancia 65%. Fuente: elaboración propia.

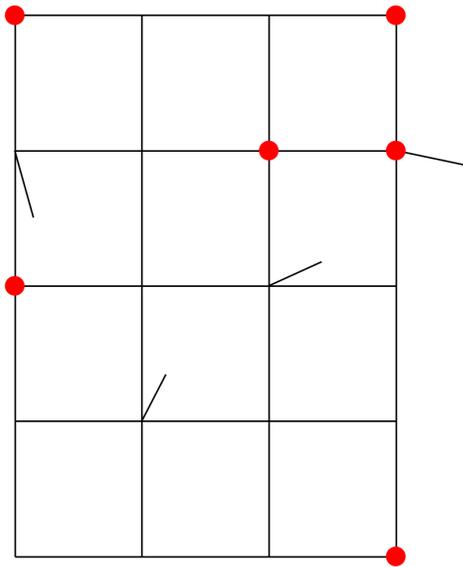


Figura A.14: Localización óptima de 6 sensores. Cobertura total 70% y cobertura sin redundancia 70%. Fuente: elaboración propia.

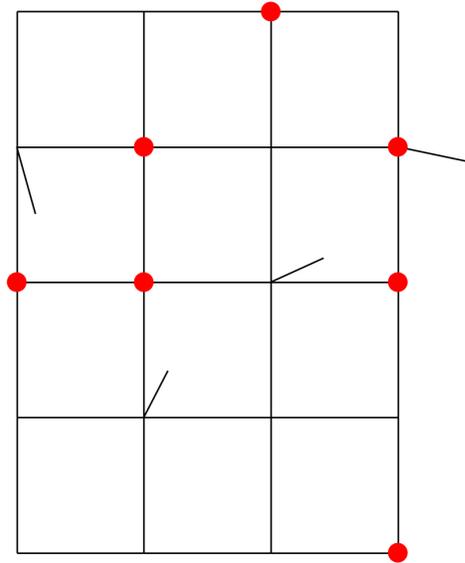


Figura A.15: Localización óptima de 7 sensores. Cobertura total 75% y cobertura sin redundancia 75%. Fuente: elaboración propia.

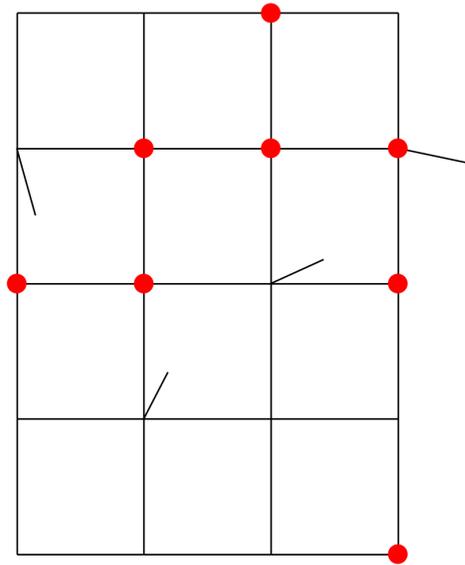


Figura A.16: Localización óptima de 8 sensores. Cobertura total 80% y cobertura sin redundancia 80%. Fuente: elaboración propia.

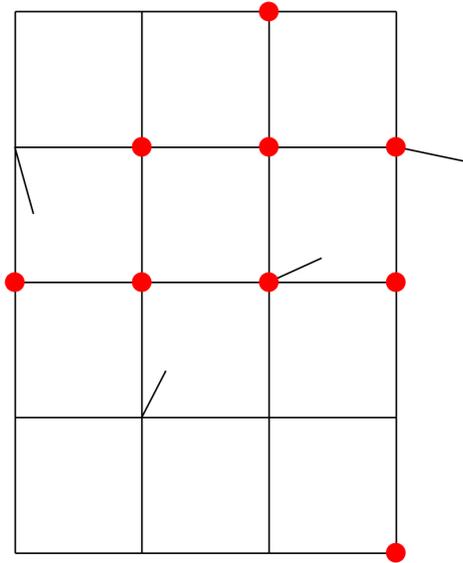


Figura A.17: Localización óptima de 9 sensores. Cobertura total 80% y cobertura sin redundancia 80%. Fuente: elaboración propia.

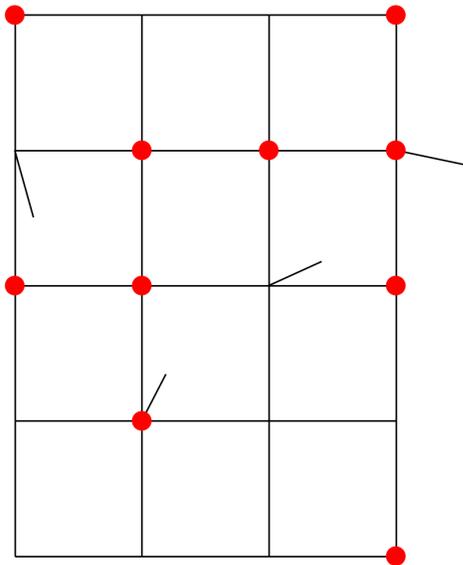


Figura A.18: Localización óptima de 10 sensores. Cobertura total 90% y cobertura sin redundancia 80%. Fuente: elaboración propia.

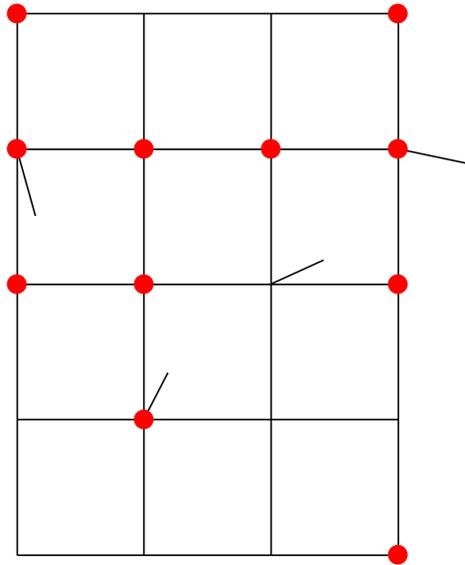


Figura A.19: Localización óptima de 11 sensores. Cobertura total 90% y cobertura sin redundancia 75%. Fuente: elaboración propia.

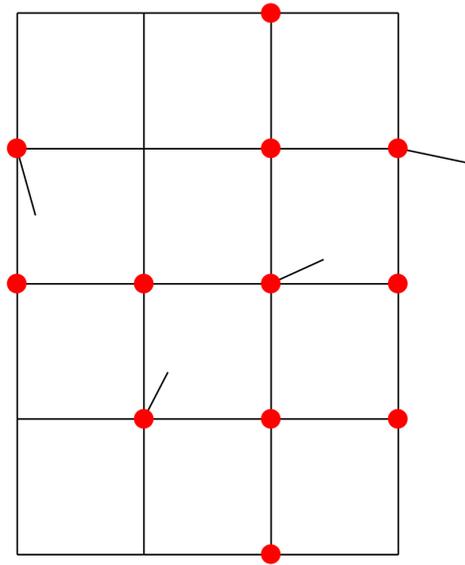


Figura A.20: Localización óptima de 12 sensores. Cobertura total 90% y cobertura sin redundancia 75%. Fuente: elaboración propia.

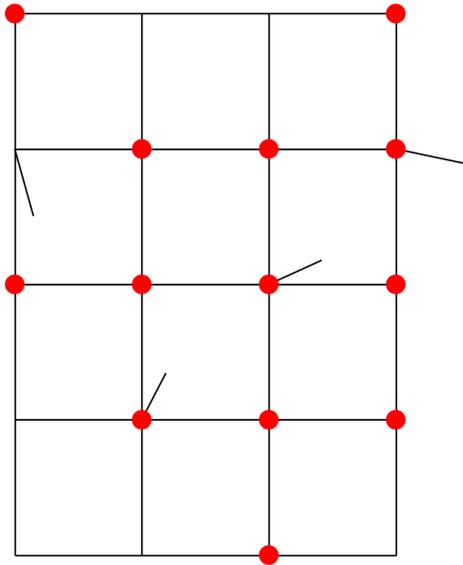


Figura A.21: Localización óptima de 13 sensores. Cobertura total 95% y cobertura sin redundancia 75%. Fuente: elaboración propia.

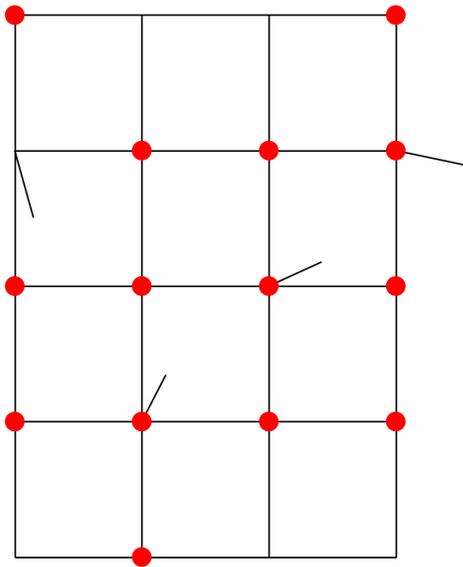


Figura A.22: Localización óptima de 14 sensores. Cobertura total 90% y cobertura sin redundancia 65%. Fuente: elaboración propia.