

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY
CAMPUS MONTERREY
PROGRAMA DE GRADUADOS EN MEGATRONICA
Y TECNOLOGIAS DE INFORMACION



DESARROLLO Y COMPARACION DE METODOS DE DETECCION
DE FUGAS EN REDES DE DISTRIBUCION DE AGUA POTABLE

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD
EN AUTOMATIZACION

POR:

MYRNA VIOLETA CASILLAS PONCE

MONTERREY, N. L.

MAYO, 2011

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY
CAMPUS MONTERREY
PROGRAMA DE GRADUADOS EN MECATRONICA
Y TECNOLOGIAS DE INFORMACION



DESARROLLO Y COMPARACION DE METODOS DE DETECCION
DE FUGAS EN REDES DE DISTRIBUCION DE AGUA POTABLE

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD
EN AUTOMATIZACION

POR:

MYRNA VIOLETA CASILLAS PONCE

MONTERREY, N. L.

MAYO, 2011

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Campus Monterrey

**PROGRAMA DE GRADUADOS EN MECATRÓNICA Y TECNOLOGÍAS
DE INFORMACIÓN**



**Desarrollo y Comparación de Métodos de Detección de Fugas en
Redes de Distribución de Agua Potable**

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el grado académico de:

Maestra en Ciencias con Especialidad en Automatización

por

Myrna Violeta Casillas Ponce

Monterrey N.L.

Mayo 2011

**DESARROLLO Y COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE
DETECCIÓN DE FUGAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE
AGUA POTABLE**

POR:

MYRNA VIOLETA CASILLAS PONCE

TESIS

**Presentada al Programa de graduados en Mecatrónica y Tecnologías de
Información**

**Este trabajo es requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con
Especialidad en Automatización**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE
MONTERREY**

MAYO 2011

Dedicatoria

A quienes me dieron la vida regalándome su amor incondicional, mis padres Margarita y Manuel y a quienes la iluminan a cada instante y la llenan de alegría, mis hermanos Manuel e Idalia.

Agradecimientos

A Dios, por bendecirme siempre y darme la oportunidad de realizar cada uno de los retos que me he propuesto.

A mis padres, por su amor, su ayuda incondicional en cada paso de mi carrera, por todos los esfuerzos que han hecho para que pueda siempre salir adelante, por cada palabra de aliento cuando yo estaba a punto de perderlo y por el brillo en sus ojos cuando mi felicidad los hizo sentir felices.

A mis hermanos, por darme el ánimo necesario y hacerme sonreír en los momentos difíciles, enseñándome que aunque a veces el camino es cuesta arriba, al final la vista es excelente, por sus risas, por extrañarme y dejarme extrañarlos mostrándome que el amor crece con y a pesar de la distancia.

A toda mi familia, que a cada paso estuvieron conmigo brindándome su cariño y apoyo.

A mi asesor el Dr. Luis Eduardo Garza Castañón, por ser conmigo una persona excepcional, por sus enseñanzas a lo largo de mis estudios de maestría y por empujarme siempre a realizar un esfuerzo extra para realizar un buen trabajo.

Al personal de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) y del Institut de Robòtica i Informàtica Industrial, en especial al Dr. Vicenç Puig Cayuela por compartir conmigo gran parte de su conocimiento, por su disposición para colaborar en el proyecto durante la estancia realizada, por su paciencia y sencillez.

Al comité de tesis, por tomarse el tiempo necesario para hacer una revisión del trabajo y por los consejos recibidos para la mejora del mismo.

A mis amigos del Tecnológico de Monterrey, por su compañía durante este trayecto, por estar conmigo en los momentos importantes y en los momentos de distracción, por darme su amistad desinteresada y sincera.

A todos mis grandes amigos de la ciudad de Parral, porque a pesar de estar lejos siempre siguieron brindándome su compañía y amistad en cada logro importante.

A mis compañeros y amigos del IRI y en general de Barcelona por recibirme con cariño, por acompañarme durante el tiempo que compartimos y por todas las enseñanzas que involuntariamente me regalaron.

Resumen

En la actualidad, uno de los problemas más importantes en el mundo es el de las fugas de agua que se presentan en las ciudades, ya que en algunos casos representan entre el 25% y el 30% del total de agua que pasa por las redes de distribución. Por ello, se tomó la decisión de iniciar este proyecto, en el cual, se tiene como objetivo principal conocer cuáles son los algoritmos más robustos, capaces de detectar fugas de diferentes magnitudes en redes de distribución de agua potable, basados en las mediciones de presión y/o flujo en cada uno de los nodos y tuberías existentes.

Entre las principales aportaciones de la presente tesis, se tiene la actualización del estado del arte en cuanto a métodos, técnicas y desarrollo de trabajos de detección de fugas en redes de agua, además, se logra un nuevo enfoque de análisis de redes para detección de fugas, en el que se toma en cuenta un horizonte de tiempo, ya que los análisis realizados hasta el momento se manejan de acuerdo a instantes de tiempo, lo que ocasiona que no se tomen en cuenta los cambios en la demanda, de la misma manera se logra aplicar este tipo de detección utilizando 5 métodos distintos que son: un método basado en la binarización en el que se establecen umbrales de detección con el fin de decidir si un cambio de presión afecta o no a un nodo en determinado tiempo, el método de correlación de datos, distancia euclidiana y ángulo que se basan en el análisis de vectores para determinar dónde existen más probabilidades de fuga, y el método de optimización por mínimos cuadrados, el cual encuentra el tamaño de fuga más adecuado que minimiza el error entre las presiones esperadas contra las calculadas de manera nominal utilizando matrices de sensibilidad. Dichos métodos aunque no son del todo nuevos, se les da una aplicación distinta a las conocidas hasta el momento aprovechando el comportamiento de la red y los residuos de la misma durante un horizonte de tiempo establecido. Como última contribución de gran importancia se tiene el hecho de que se realiza una comparación de los métodos utilizados para detección de fugas, pudiendo entender mediante simulación cual de los métodos propuestos entrega el mejor resultado ante escenarios ideales y con ruido, con el fin de saber elegir el método que mejor se adapte al escenario real. Para cada uno de los métodos analizados se obtienen resultados muy interesantes, puesto que en la mayoría de los casos se obtienen eficiencias muy buenas, a excepción del método de distancia euclidiana, el cual puede ser utilizado únicamente cuando la magnitud de la fuga es igual a aquella con la que se diseñaron las matrices de sensibilidad; el método que presenta los mejores resultados ante cualquier escenario, es el método del ángulo, puesto que su eficiencia en detección, localización y estimación de fuga es siempre mayor al 96%, el método de correlación y el método de optimización presentan comportamientos similares entre sí, con eficiencias superiores a 90%, sin embargo se afectan por condiciones especiales de configuraciones de las redes (dichas configuraciones pueden tratarse tanto de cantidad de nodos de una red, cantidad de datos de presiones o a la manera en que están localizados los nodos en la malla de la red en cuestión), por último el método de binarización resulta efectivo ante varios escenarios, pero cuando existe ruido su eficiencia es aproximadamente de 70%. Se concluye que el mejor método que se puede utilizar de acuerdo al análisis experimental realizado es el método del ángulo entre vectores, puesto que a pesar de la presencia de ruido en la demanda, en la medición o configuraciones especiales en las redes, siempre detecta tanto el nodo con fuga como la magnitud con exactitudes muy cercanas al 100%.

TABLA DE CONTENIDO

1. Propuesta	1
1.1 Definición del problema	1
1.2 Objetivo	1
1.3 Justificación	1
1.4 Hipótesis	2
1.5 Alcances y Limitaciones	2
1.6 Estrategia	2
2. Estado del arte	3
3. Marco Teórico	8
3.1 Redes de Distribución de agua	8
3.1.1 Descripción y conceptos principales	8
3.1.2 Modelado de redes de distribución de agua potable	9
Aspectos generales	9
Modelado con ecuaciones	9
Tanque:	9
Nodo sin demanda:	10
Depósito	10
Tuberías	11
Válvulas	12
Ley de continuidad de flujo.....	14
Modelado de los nodos	15
4. Epanet	18
4.1 Introducción al uso del software	18
4.2 Descripción del área de trabajo.....	18
4.3 Análisis hidráulico en Epanet.....	20
5. Experimentación	23
5.1 Métodos de detección, aislamiento e identificación	24
5.1.1 Algoritmo de construcción de las matrices de sensibilidad.....	24
5.1.2 Algoritmo de detección, aislamiento e identificación de fugas por los distintos métodos propuestos.....	26
5.1.2.1 Método de binarización de matrices.....	26
5.1.2.2 Método de correlación de datos	29
5.1.2.3 Método de distancia euclidiana.....	31

5.1.2.4 Método del ángulo entre vectores	31
5.1.2.5 Método de aislamiento utilizando la optimización por mínimos cuadrados.....	32
5.1.3 Análisis de fuga mínima detectable ante ruido en la red.....	35
5.2 Aplicación de los métodos en las redes experimentales	37
5.2.1 Aplicación en la primera red - Hanoi.....	37
5.2.2 Aplicación en la segunda red – Benchmark	50
5.2.3 Aplicación en la tercer red – Quebra	56
6. Pruebas y resultados	61
6.1 Pruebas realizadas	61
A. Pruebas en la red de Hanoi.....	62
Interpretación de resultados en Hanoi.....	65
B. Pruebas en la red de Benchmark.....	67
Interpretación de resultados en Benchmark	68
C. Pruebas en la red de Quebra	69
Interpretación de resultados en Quebra.....	71
6.2 Discusión de resultados.....	71
7. Conclusiones	74
Trabajo Futuro.....	75
APÉNDICE A	76
ALGORITMO DE DISEÑO DE MATRICES DE SENSIBILIDAD.....	76
APÉNDICE B.....	79
ALGORITMO DE DETECCIÓN DE FUGAS BASADO EN LOS 5 MÉTODOS PROPUESTOS.....	79
APÉNDICE C	88
TABLAS DE RESULTADOS PARA CADA PRUEBA DE DETECCIÓN DE FUGA EN CADA NODO DE LA RED DE HANOI	88
APÉNDICE D	99
TABLAS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS ALEATORIAS APLICADAS A CADA UNA DE LAS REDES.....	99
Bibliografía.....	112

Índice de Figuras

Fig. 1 Esquema de un tanque de almacenamiento de la red.	10
Fig. 2 Esquema de un nodo sin demanda en la red.	10
Fig. 3 Modelo de un depósito	11
Fig. 4 Modelo de una tubería.	12
Fig. 5 Tubería equipada con una válvula.....	12
Fig. 6 Configuración generalizada de una i-ésima estación de bombeo.....	14
Fig. 7 Estructura de la red.....	15
Fig. 8 Barra de herramientas Epanet	19
Fig. 9 Entorno de trabajo básico en EPANET	20
Fig. 10 Diagrama de detección, aislamiento y estimación de fugas mediante simulación	23
Fig. 11 Diagrama de creación de matrices de sensibilidad.....	27
Fig. 12 Diagrama de funcionamiento del método de binarización.....	28
Fig. 13 Diagrama de funcionamiento de métodos de correlación, ángulo y distancia euclidiana.....	33
Fig. 14 Diagrama de funcionamiento del método de optimización por mínimos cuadrados.....	34
Fig. 15 Configuración de la primera red de aplicación	37
Fig. 16 Patrón de demanda para Hanoi	38
Fig. 17 Patrón de fugas para Hanoi.	38
Fig. 18 Matriz de sensibilidad para el instante de mayor consumo	40
Fig. 19 Matriz de sensibilidad considerando una fuga en el índice 15 en un horizonte de 24 horas ...	41
Fig. 20 Residuos en el nodo 5 a lo largo de 24 horas.....	42
Fig. 21 Residuos actuales a lo largo de toda la red para el instante de mayor consumo	43
Fig. 22 Matriz de sensibilidad binarizada para el instante de mayor consumo.....	43
Fig. 23 Vector de residuos actuales binarizado para el instante de mayor consumo.....	44
Fig. 24 Correlación de vectores en el instante de mayor consumo	45
Fig. 25 Total de la sumatoria de correlaciones a lo largo del horizonte de tiempo.....	45
Fig. 26 Distancia euclidiana del vector de residuos a la hora de mayor consumo contra la matriz de sensibilidad correspondiente.....	46
Fig. 27 Distancia euclidiana de los residuos a cada posible fuga durante 24 horas	47
Fig. 28 Ángulo entre vector de residuos y matriz de sensibilidad a la hora de mayor consumo	47
Fig. 29 Ángulo medio a lo largo del horizonte de tiempo para cada posible fuga.....	48
Fig. 30 Magnitudes de fuga que minimizan el error de acuerdo a las matrices de sensibilidad de cada posible fuga.....	49
Fig. 31 Magnitudes de errores en la optimización	49
Fig. 32 Segunda red de prueba – Benchmark1	51
Fig. 33 Patrón de demanda para la red Benchmark.....	51
Fig. 34 Matrices de sensibilidad para la red Benchmark a) matriz de sensibilidad en la hora de menor consumo b) Matriz de sensibilidad en el horizonte de tiempo aplicando una fuga en el nodo 12	52
Fig. 35 Comparación del vector de residuo actual binarizado y la matriz de sensibilidad en la hora de menor consumo.	53
Fig. 36 Sumatoria de correlaciones para fuga aplicada en Benchmark.....	53
Fig. 37 Sumatoria de distancias a lo largo del horizonte de tiempo especificado.....	54
Fig. 38 Ángulo medio entre vectores a lo largo de 24 horas	54

Fig. 39 a) Tamaños de fuga para minimizar el error b) Error en cada posible fuga.....	55
Fig. 40 Tercer red de aplicación - Quebra	55
Fig. 41 Patrón de demanda para la red Quebra	56
Fig. 42 Matrices de sensibilidad para la red Quebra a) matriz de sensibilidad en el instante de mayor consumo b) matriz de sensibilidad aplicando una fuga en el nodo 34	57
Fig. 43 Matrices de sensibilidad binarizadas para la red Quebra a) Matriz de sensibilidad binarizada para el instante de mayor consumo b) Vector de residuo actual binarizado en el instante de mayor consumo.....	57
Fig. 44 Correlación de vectores en la red Quebra	58
Fig. 45 Resultados de distancia euclidiana en la red de Quebra	59
Fig. 46 Ángulo medio para cada posible fuga a lo largo del horizonte de tiempo en la red Quebra....	59
Fig. 47 Magnitudes de fuga en Quebra	60
Fig. 48 Tamaño del error en la optimización por mínimos cuadrados	60
Fig. 49 Particularidad del nodo 2 de la red de Hanoi	66
Fig. 50 Nodo especial debido a la configuración de la red	68
Fig. 51 Nodos con confusiones comunes a lo largo de las pruebas	71

Índice de Tablas

Tabla 1 Síntesis del estado del arte en detección de fugas en redes de distribución de agua potable. ...	7
Tabla 2 Fórmulas de pérdida de carga para tubería llena	22
Tabla 3 Datos para la construcción del escenario real (Hanoi Vietnam 1990)	39
Tabla 4 Datos de la segunda red de prueba	50
Tabla 5 Eficiencia ante cambio en magnitudes de fuga	62
Tabla 6 Eficiencia ante ruido de 2% en la demanda	63
Tabla 7 Eficiencia ante ruido de 4% en la demanda	64
Tabla 8 Eficiencia ante ruido en la medición.....	64
Tabla 9 Eficiencia aplicando ruido tanto en la demanda como en la medición actual.....	65
Tabla 10 Eficiencia en pruebas aleatorias aplicadas a la Red Hanoi	65
Tabla 11 Resultados de efecto de magnitud de las fugas en la red Benchmark.....	67
Tabla 12 Resultados aplicando ruido en la demanda	67
Tabla 13 Resultados del efecto de ruido en la medición	67
Tabla 14 Resultados ante ambas incertidumbres en Benchmark	68
Tabla 15 Eficiencia en pruebas aleatorias aplicadas a la red de Benchmark.....	68
Tabla 16 Resultados de cambio en magnitud de la fuga en la red Quebra	69
Tabla 17 Resultados ante ruido en la demanda.....	69
Tabla 18 Resultados obtenidos ante ruido en la medición en Quebra.....	70
Tabla 19 Resultados ante el efecto de ambas incertidumbres.....	70
Tabla 20 Eficiencia en pruebas aleatorias aplicadas a la red de Quebra	70
Tabla 21 Eficiencia final del método de binarización	71
Tabla 22 Eficiencia final del método de correlación.....	72
Tabla 23 Eficiencia final del método de distancia euclidiana.....	72
Tabla 24 Eficiencia final del método de ángulo entre vectores	72
Tabla 25 Eficiencia final del método de optimización.....	72
Tabla 26 Discusión de resultados por método de detección.....	73

Notación Matemática

P	Matriz de presiones nominales en la red
n	Número de nodos de la red
m	Muestras a lo largo del tiempo de simulación
P_{fuga}	Matriz de presiones actuales (en escenario con fugas)
\mathcal{R}	Residuos de presión
l	Tamaño de fuga en litros por segundo
S	Matriz de sensibilidad calculada
S_{bin}	Matriz de sensibilidad binarizada
S_{fugas}	Matrices de sensibilidad por fuga posible
\mathcal{R}_{bin}	Residuos actuales binarizados
$fuga_{bin}$	Vector que indica la presencia o ausencia de fugas en cada instante de tiempo
$vector_{fuga}$	Vector que indica la presencia o ausencia de fugas en el horizonte de tiempo
$indice_{fuga}$	Índice del nodo que tiene una fuga
C	Coefficiente de correlación
C_{hte}	Coefficiente de correlación a lo largo del horizonte de tiempo
m_f	Magnitud de la fuga detectada
\mathcal{D}_e	Distancia euclidiana
\mathcal{D}_{ehte}	Distancia euclidiana a lo largo del horizonte de tiempo
α	Ángulo entre vectores
α_{hte}	Ángulo entre vectores a lo largo del horizonte de tiempo
d	Demanda por instante de tiempo
y	Representación de mediciones en análisis de fuga mínima
Δd	Ruido en la demanda
Δy	Ruido en la medición

Introducción

El presente trabajo consta de diversas secciones organizadas de la siguiente manera: en el capítulo 1 se encuentra la propuesta, en ella se detallan los objetivos y justificación de la realización del proyecto, así como la estrategia a seguir para lograr dichos objetivos; enseguida, en el capítulo 2 se presenta el estado del arte correspondiente al área de detección de fugas en redes de distribución de agua potable; en esta sección se presentan los trabajos más relevantes a la presente investigación. Siguiendo con el orden que se tiene, en el capítulo 3 se encuentra el marco teórico, el cual contiene la información necesaria para el modelado matemático de las redes, los conceptos importantes y fundamentos de las técnicas a utilizar. En la cuarta sección, se tiene una breve explicación sobre el software EPANET que se va a utilizar para la modelación de las redes y la experimentación. Este software permite el diseño y análisis hidráulico de redes de agua, de acuerdo con datos conocidos, como diámetros y longitudes de tuberías, así como demandas de cada uno de los nodos. Por último, se tiene la sección de experimentación, donde se realiza el diseño y programación de los algoritmos utilizados para la detección de fugas en diferentes redes existentes. En este trabajo se estudiaron 3 redes distintas, la primera es la red de Hanói tomada de [3], siguiendo con la red de Benchmark, la cual se obtuvo de [23] y por último la red de Quebra obtenida de [24]. También se presentan en el capítulo 5 de experimentación las ecuaciones obtenidas para el diseño de cada algoritmo, de acuerdo a la técnica que se esté utilizando, así como la metodología considerada. Posteriormente, se presenta una muestra de funcionamiento de cada método para cada una de las redes propuestas. Al final, en el capítulo de pruebas y resultados, se presentan las pruebas diseñadas para comprobar cada método y comparar el funcionamiento de cada uno, y se dan a conocer las tablas de resultados de eficiencia. Estos datos permiten entender cuál de los métodos tiene un mejor desempeño ante ciertas condiciones.

1. Propuesta

1.1 Definición del problema

Los problemas más importantes dentro de los sistemas de distribución de agua, son el uso sostenible de recursos hidráulicos limitados, la capacidad de abastecimiento a los consumidores, y sobre todo la minimización de pérdidas y fugas desde el abastecimiento hasta el consumidor final [1]. De acuerdo a esto, y a investigaciones realizadas acerca de la situación que se presenta en muchas de las redes existentes, se tiene el siguiente problema específico:

- Es necesario tener la capacidad de detectar fugas en las redes de distribución de agua potable sin necesidad de implementar nuevos y sofisticados sistemas, sino tomando en cuenta los datos disponibles, como son presión y flujo de caudal, debido a que se sabe que en la mayoría de los casos las pérdidas representan alrededor del 30% del caudal de abastecimiento.

1.2 Objetivo

El objetivo general de esta tesis es comparar los métodos que existen para detección de fugas simples en redes de distribución de agua potable y desarrollar un nuevo algoritmo que permita comparar los resultados obtenidos por los otros algoritmos, en la presencia de ruido en los datos y demandas de agua variables con el tiempo, de acuerdo con lo generado en una red real. Es decir, tomando en cuenta que las demandas de los nodos (colonias o casas habitación de cada ciudad) tienen un patrón que varía conforme el paso del día.

Los objetivos específicos son los siguientes:

1. Actualización del estado del arte en cuanto a detección de fugas en redes de distribución de agua potable.
2. Generar un escenario de simulación de fugas de una red real, con el cual sea posible generar datos de presión y flujo confiables, con ayuda del software EPANET.
3. Construir modelos de detección de fugas que utilicen datos precisos tales como presiones y flujos en la red.
4. Implementar los algoritmos de detección basados en algunas de las técnicas especializadas.
5. Desarrollar un nuevo algoritmo de detección de fugas
6. Validar los resultados obtenidos de la aplicación de los algoritmos anteriores en simulaciones.
7. Comparar los resultados obtenidos por los diferentes métodos.

1.3 Justificación

Las fugas en redes de agua traen consigo gran cantidad de pérdidas, tanto en costo de transporte al consumidor, como en aumento de tarifas, tiempo y costo de reparación, etc. Lo que implica gastos excesivos que al final de cuentas se trasladan a los consumidores.

Además, la difícil ubicación de las tuberías (subterránea en la mayoría de los casos), hace casi imposible el estar constantemente revisando el estado en el que se encuentran.

La única manera de remediar una fuga en caso de que ésta se presente, es intervenir de inmediato para que el daño ocasionado no sea excesivo, para lo cual es necesario contar con un

sistema de monitoreo remoto, que indique el lugar en el que dicha fuga se está presentando, de manera confiable y precisa, para de este modo proceder con acciones pertinentes de alivio y reparación.

En este trabajo se propone la implementación y comparación de diferentes algoritmos del estado del arte que basados en las mediciones de presión y/o flujo, con las que regularmente se cuenta en los sistemas hidráulicos, permita encontrar la localización de una fuga de manera rápida y certera.

1.4 Hipótesis

En la presente tesis se tiene como base la hipótesis de que es posible implementar los algoritmos de detección de fugas en redes de distribución de agua potable, tomando como datos las mediciones de presión y/o flujo en cada uno de los nodos que componen la red. Los datos serán obtenidos mediante las simulaciones de comportamiento normal y comportamiento de fuga, realizando comparaciones entre ambos.

1.5 Alcances y Limitaciones

El alcance del presente trabajo es la implementación y la validación de algoritmos capaces de diagnosticar fugas en una red de distribución de agua, desde fugas pequeñas e individuales, hasta fugas de mayor tamaño. Los escenarios de experimentación contemplan la existencia de una sola fuga a la vez.

Los datos provienen de un simulador de redes de distribución de agua (EPANET) del que se extraen los datos correspondientes para escenarios muy similares a los que existen en la realidad.

1.6 Estrategia

Durante mucho tiempo ha existido el problema de fugas en las redes de agua potable, por lo cual se ha realizado una vasta investigación en el tema, sin embargo, la mayoría de ellas se refiere a la detección de las mismas en ductos, o tramos de tuberías, es decir, entre dos puntos específicos de la red, por lo cual ahora se pretende seguir una estrategia distinta, es decir, tomar un camino referido al comportamiento de la red completa, incluyendo los cambios de presiones y flujos en cada una de las redes y nodos que la conforman.

La metodología que se sigue es primero construir un escenario en el software elegido para realizar las simulaciones. Para esto se hace necesario entender el funcionamiento del mismo, lo que se logra mediante [2] donde se especifica el uso correcto del software, además es necesario contar con datos aplicados en alguna red conocida, como la presentada en [3]. Con el fin de tener un punto de comparación además de poder analizar el comportamiento de los algoritmos en otras dos redes simuladas.

Luego de tener un escenario confiable, se procede a buscar las técnicas de diagnóstico especializadas que puedan resolver el problema que se tiene, con el fin de encontrar la que mejor satisfaga las necesidades del sistema, y para así obtener resultados confiables. Una vez obtenidos los resultados, se procederá a realizar la comparación de cada método utilizado con el fin de concluir cuál resulta mejor para cada caso.

2. Estado del arte

Aunque el área de detección de fugas en tuberías ha sido muy investigada, no ocurre lo mismo cuando se refiere a fugas en sistemas completos de redes de distribución de agua potable, sin embargo, los esfuerzos hechos hasta ahora por encontrar una solución a las fugas en las actuales redes, reflejan lo siguiente:

Uno de los aspectos más importantes al momento de detectar fugas, es situar correctamente los sensores de medición, para lo cual se puede utilizar el método descrito en [4] es decir el problema de localización para máxima cobertura; éste es capaz de identificar la localización óptima de la instrumentación en las instalaciones. En los modelos de localización se deben tomar en cuenta dos mediciones: (1) el ancho total de distancia o tiempo de viaje para las instalaciones y (2) la distancia o tiempo que el usuario más lejano a una instalación tendría que viajar para llegar a ésta, es decir, la máxima distancia de servicio.

Este problema identifica el mínimo número y la localización de las instalaciones, lo que asegura que no exista un punto de demanda que rebase la distancia máxima de servicio desde una instalación. Resolviendo el problema de conjunto de cobertura sobre un rango de valores de distancia es posible desarrollar una curva de costo – efectividad para el par de números (máxima distancia de servicio y mínimo número de instalaciones a cubrir).

Si se examina la curva de costo – efectividad se determina que para un número dado de instalaciones, puede haber muchas soluciones de localización, las cuales cumplen con los requerimientos de cobertura. Para un nivel deseado de gasto, (por ejemplo con un número fijo de instalaciones) se puede determinar la solución con la más pequeña distancia máxima de servicio. Puede suceder que el valor de distancia obtenido, sea mucho mayor que la distancia deseada. Si esto ocurre el tomador de decisiones puede concentrar su atención en la población cubierta por la distancia deseada. Habiendo analizado si las instalaciones son insuficientes para toda la cobertura dentro de la distancia deseada, el tomador de decisiones buscará cubrir la mayor población posible dentro de la distancia deseada usando los recursos limitados. El problema puede ser propuesto de la siguiente manera: Maximizar la cobertura con una distancia de servicio deseada, localizando un número fijo de instalaciones.

Los autores de [5] proponen un método con el cual pueden identificarse las fugas de agua mediante puntos ciegos, basados en trabajos anteriores de localización de fugas mediante análisis de señales de vibración y/o acústica [6], modelo de tubería enterrada para predecir velocidad de onda [7], y experimentos validados para casos de tuberías enterradas y tubos en vacío [8,9], entre otros, cuyas investigaciones indican que si las condiciones de la tubería son conocidas (como espesor, propiedades de material y medios que la rodean) la velocidad de propagación puede ser calculada usando el modelo teórico correspondiente. Las técnicas de identificación de canal de puntos ciegos han ganado gran atención a raíz de la idea innovadora propuesta por Sato [10], el canal de acústica de fugas supone ser un sistema invariante en el tiempo, resuelto con técnicas como mínimos cuadrados, algoritmos de dominio de frecuencia multi-canal, el algoritmo de Newton multi-canal el cual ofrece un buen desempeño cuando los canales están condicionados, algoritmos QR, etc.

La detección de fugas en tuberías puede llevarse a cabo resolviendo un problema inverso [12], utilizando mediciones de presión y/o flujo. El problema es formulado con orificios equivalentes en diversas áreas de posibles fugas desconocidas. Minimizando la diferencia entre las mediciones y los cálculos, puede haber una solución para dichas áreas. Para efectos de análisis en este punto se asume que las fugas están en los nodos, es decir que resultara en una demanda mayor el hecho de que una fuga se presente. En los análisis normales, se conocen las demandas de los nodos y las características del sistema, mientras que se buscan los valores de la presión y la manera en que el flujo se divide, en este caso en el problema inverso se conocen las características del sistema y algunas de las cantidades de las demandas son desconocidas. Si las cantidades conocidas se extienden a un número suficiente de presiones, es posible, en teoría encontrar las fugas. En ocasiones el problema puede tener muchas soluciones, sin embargo, si se toman en cuenta restricciones, el número de soluciones disminuye, aunque con demasiadas restricciones, el problema puede no tener solución. Las características de un problema bien planteado son: 1) la solución existe para todos los datos admitidos, 2) la solución depende continuamente de los datos y 3) la solución es única para todos los datos admisibles. Las ecuaciones de flujo en la tubería son:

$$\sum_{tuberías} Q_{k_{ij}} = D_i + q_i^l \quad (1)$$

Donde k_{ij} = número de la tubería que se encuentra entre los nodos i y j ; D = demanda (flujo de salida conocido) al nodo (puede ser negativa); q_i^l = fuga en el nodo; y $Q_{k_{ij}}$ = flujo en la tubería k_{ij} que es positivo del nodo i al j .

La caída de presión en la tubería es:

$$p_i - p_j = K_{k_{ij}} |Q_{k_{ij}}| - \gamma(E_i - E_j) \quad (2)$$

Donde p = presión; γ = peso específico del fluido; K = coeficiente de resistencia, e incluye el diámetro de la tubería; n = exponente a aplicar a la velocidad en la ecuación de fricción; y E = elevación. Los valores desconocidos son los de p para cada nodo y Q para cada tubería.

Las fugas son usualmente desconocidas y pueden ser expresadas en términos de presión por la formula:

$$q_i^l = C_{oi} A_i^l \sqrt{\frac{2gp_i}{\gamma}} \quad (3)$$

En la cual C_{oi} = coeficiente de orificio y A_i^l = equivalente área de orificio

El problema inverso puede ser incluso determinado donde un nivel de presión o flujo es dado para cada demanda o parámetro desconocido, indeterminado cuando hay más parámetros desconocidos que ecuaciones o sobre determinado donde se tienen más mediciones y ecuaciones que parámetros desconocidos.

En [13] se propone un método de ubicación de fugas utilizando una máquina de soporte vectorial (SVM por sus siglas en inglés). Este trabajo presenta un método de extracción de datos obtenidos por un conjunto de sensores de control de presión de una red de tuberías para obtener información sobre la ubicación y tamaño de las fugas en la red. Este problema de ingeniería inversa se lleva a cabo mediante máquinas de soporte vectorial (SVM) que actúan como reconocedores de patrones, dichos datos son clasificados en caso de que se esté trabajando como un clasificador con el

error cuadrático medio (*sme*) y con el coeficiente de correlación (R^2) si actúa como reconocedor de patrones. El método de localización y predicción utilizado fue desarrollado por medio de monitoreo de presión en los diferentes nodos de la red de tuberías en consideración, el SVM es entrenado utilizando diferentes tamaños y posicionamiento de fugas, para lo cual se utiliza la herramienta de simulación de redes de agua EPANET como se muestra a continuación:

La definición de los emisores de agua está basada en:

$$\text{flowrate: } Q = C * A * P^{P_{exp}} \quad (4)$$

Donde C es un coeficiente, A es el área del orificio de apertura, P es la presión del flujo y P_{exp} es el exponente de la presión, el cual es típicamente 0.5.

Basados en esto, EPANET aplica una simple definición para los emisores:

$$EC = \frac{Q}{P^{P_{exp}}} \quad (5)$$

Donde EC es el coeficiente del emisor, Q el caudal de flujo, P es la presión del fluido y P_{exp} es el exponente de presión.

El artículo muestra como el caudal deseado de fugas de entre 50 y 100 l/hr sólo pueden lograrse poniendo coeficientes a los emisores de 0.001 en combinación con un exponente de presión de 0.5.

Siguiendo con la investigación, se realizan los experimentos deseados en EPANET simulando una red de tuberías ubicada en Melbourne, obteniendo resultados de eficiencia entre el 32 y el 57%, con valores bajos en cuanto al error medio cuadrático y el coeficiente de correlación se refiere.

En [14] se presenta un documento centrado en la detección de fugas y localización en redes de tuberías, basado en un enfoque reciente y novedoso, conocido como análisis inverso de transitorios. La idea principal detrás de esta metodología es la identificación de la localización de fugas en redes de tuberías a partir de datos observados de presión, recogidos durante la ocurrencia de eventos transitorios, y la minimización de la diferencia entre los parámetros observados y calculados. Este enfoque se presenta conceptualmente y aplicado a una herramienta de software. Se propone la detección de fugas en una red de 8 nodos, como resultados experimentales, se muestra como ejemplo únicamente la detección de una fuga. El solucionador Inverso (IS) es el motor de búsqueda que ejecuta el procedimiento de optimización y trata de encontrar la mejor solución del problema de minimización. Por otra parte, el solucionador transitorio (TS) es el simulador de los eventos transitorios hidráulicos, dadas ciertas condiciones del entorno. El TS es llamado por el IS con el fin de evaluar la función objetivo (OF) o para el cálculo de los derivados. A pesar de que ambos módulos están interconectados, es independiente el uno del otro, ya que el TS puede ser ejecutado fuera del IS y de la misma manera, el IS puede aplicarse a cualquier otro simulador hidráulico.

En [25] se propone una técnica de aislamiento de fallas que utiliza el análisis difuso de los residuos basado en el modelo del proceso en cuestión. El procedimiento descrito trata de encontrar los residuos entre las mediciones normales en ausencia de falla contra las mediciones en las que esté ocurriendo dicha falla, es decir, que se espera que en ausencia de la misma el residuo sea cero y diferente de cero en otro caso. Luego se construye una matriz de firma de fallas en la que cada elemento de las columnas indica de forma booleana la influencia de una falla en el residuo correspondiente; se realiza la detección utilizando la distancia euclidiana existente entre los vectores de la matriz de firma de fallas y los vectores de residuos calculados para cada instante de tiempo. Una

de las variaciones utilizadas en esta investigación, es la de proponer cuando la influencia en el residuo sea positiva, un valor de 1 en la matriz, mientras que si se tiene una influencia negativa en el residuo, se aplicará un valor de -1 en la matriz, con lo que las firmas se vuelven menos repetitivas, de ahí se parte para iniciar el proceso de aislamiento mediante el concepto difuso, en el cual se proponen tres funciones de membresía dependiendo del valor de la firma obtenida (“+”, “0” ó “-”). El método se aplica mediante simulación a una estación de bombeo que forma parte de una red de distribución de agua, la cual se compone de 4 tanques, uno de ellos el tanque principal y tres tanques secundarios abastecidos por el anterior, para la detección se utilizan las mediciones de altura y caudal de la estación, los estados de trabajo de las bombas y dos de las presiones existentes. Como trabajo experimental, se realizan un aislamiento de una fuga en la red mencionada, estudiando los residuos obtenidos, y se obtiene el resultado esperado, en el que se identifica una fuga de caudal de una de las tuberías.

En [28] se propone el uso de las mediciones de presión y análisis de sensibilidades de la misma, para cada uno de los nodos de la red, mediante simulaciones en presencia y ausencia de fugas. En este trabajo, una vez obtenidas las matrices de comportamiento, son binarizadas utilizando umbrales independientes en cada nodo. Se propone también una optimización en la localización de los sensores disponibles basada en algoritmos genéticos. Se logra la detección exacta de 100% de fugas en ausencia de incertidumbre en la demanda, sin embargo cuando se tiene incertidumbre, los resultados no son del todo satisfactorios, aunque se puede localizar la zona aproximada en la que se ubica la fuga dentro de un vecindario de nodos. En esta tesis, aunque se utiliza un concepto similar, basado en sensibilidades, se realiza una extensión del método al analizar un horizonte de datos y no solo un instante de tiempo. Esto mejora de forma notable el desempeño de varios algoritmos probados, especialmente en condiciones de incertidumbre en la demanda y ruido en las mediciones.

En [29] se analiza la posibilidad de localización de fugas mediante análisis de componentes principales de los residuos que son obtenidos en dos fases. En la primera fase se obtiene un modelo libre de fugas fuera de línea, mientras que en la segunda fase se analizan los residuos obtenidos en línea contra un umbral propuesto, cuando se detectan inconsistencias, se procede a realizar el análisis para aislar las fugas usando un mapeo establecido cuando se hizo el diseño de residuos estructurales. El método propuesto se prueba en un ejemplo ilustrativo sencillo de 4 nodos de demanda, al cual se aplican fugas simultáneas en el nodo 1 y 2 que logran ser detectadas por el método, sin embargo se tiene la desventaja de que el análisis de PCA tiene limitaciones dimensionales por lo que para redes de mayor tamaño tendrían que hacerse divisiones en sub-redes, además de que se ve afectado con el hecho de que tanto las fugas como las incertidumbres se deben considerar dentro de las demandas de los nodos.

Como puede verse a través de la investigación mostrada anteriormente, las investigaciones desarrolladas hasta el momento muestran los esfuerzos que se han hecho ante el problema de fugas, así como los logros que se han tenido en dicho ámbito, sin embargo, en el presente trabajo se probará que tomando en cuenta un horizonte de tiempo en el análisis, los resultados pueden mejorar en gran medida. En la Tabla 1 se muestra un resumen que engloba el análisis de investigaciones realizadas hasta el momento del que se habla en el presente capítulo.

SÍNTESIS DE INVESTIGACIONES EN EL ÁREA DE DETECCIÓN DE FUGAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA					
AÑO	AUTOR	CARACTERÍSTICAS DE APLICACIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS	REF.
2008	Jin Yang et al.	Identificación de fugas mediante puntos ciegos utilizando análisis de vibración y/o acústica.	Fácil cálculo de velocidad de propagación que ayuda a la identificación.	Requiere aplicación de muchos métodos complejos estudiados con anterioridad.	[5]
1975	Y. Sato	Propone la utilización de identificación de canal de puntos ciegos.	El método propuesto se usa mucho en trabajos posteriores.	No se llega hasta la detección de las fugas.	[10]
1992	Ranko S. Pudar and James A. Liggett	Detección de fugas en tuberías mediante la solución del problema inverso usando mediciones de presión o flujo.	Se logra expresar las fugas en términos de presión.	Es necesario suponer el tamaño aproximado de los orificios de fuga.	[12]
2009	Jhon Mashford et al.	Localización de fugas utilizando una máquina de soporte vectorial.	Aprovecha técnicas conocidas de reconocimiento de patrones.	Sólo se consiguen eficiencias de 32 a 57% en la experimentación.	[13]
2001	Didia Covas y Helena Ramos.	Detección de fugas basado en el análisis inverso de transitorios.	Aprovecha la información de determinados instantes de interés.	Únicamente se muestra el funcionamiento ante una fuga determinada.	[14]
2006	José Ragot, Didier Maquin.	Análisis difuso de residuos basado en el modelo del proceso.	Utiliza la distancia euclidiana entre las firmas de fallas y los residuos para localizar una fuga supuesta.	Se necesita de umbrales negativos y positivos que dificultan el aislamiento.	[25]
2010	Ramon Pérez, Vicenç Puig, et al.	Detección mediante binarización de matrices de residuos y sensibilidades y localización óptima de sensores de medición.	Se introduce el uso de sensibilidades de nodos a los cambios de presión	Al igual que en otros casos es complicada la elección del tamaño de umbral correcto.	[28]
2010	J. Gertler, J. Romera, V. Puig and J. Quevedo	Localización de fugas mediante análisis de componentes principales.	Se aprovecha un diseño de residuos estructurales y logra detectar 2 fugas simultáneas.	Tiene limitación de dimensiones por el uso de PCA por lo que no es adecuada para redes de tamaños grandes.	[29]

Tabla 1 Síntesis del estado del arte en detección de fugas en redes de distribución de agua potable.

3. Marco Teórico

3.1 Redes de Distribución de agua

3.1.1 Descripción y conceptos principales

El agua potable proviene de agua no tratada usualmente extraída de aguas subterráneas o superficiales, tales como ríos o lagos. Ésta es usualmente transportada a plantas de tratamiento de agua, donde es procesada para producir agua potable.

Un buen conocimiento de cómo se distribuye el agua a través del sistema es indispensable para construir un modelo exacto. Mover el agua de las fuentes a los consumidores requiere una red de tuberías, bombas, válvulas y otros elementos hidráulicos. Por otro lado es necesario almacenar agua para estar preparado en caso de fluctuaciones en la demanda de los consumidores o en las necesidades de uso o protección contra incendios, para lo cual se utilizan tanques o embalses.

Las redes de agua están generalmente compuestas por un gran número de tuberías, tanques de almacenamiento, bombas, válvulas y otros elementos interconectados con el fin de llevar el agua a través de los nodos de abastecimiento con niveles de presión específicos para proporcionar un buen servicio a los consumidores.

Los elementos hidráulicos de una red se pueden clasificar en activos y pasivos. Los elementos activos son aquellos que operan para controlar el flujo y/o la presión del agua en partes específicas de la red, como son bombas y válvulas; los elementos pasivos son tanques y tuberías. Dichos elementos se describen a continuación:

Tuberías: Es el elemento usado para transportar el agua de una localización a otra, se considera únicamente como la conexión entre las piezas de la red.

Tanques: Son contenedores de almacenamiento de agua, los cuales la almacenan para el consumo humano, en este caso prevén la capacidad de almacenamiento de agua. Un tanque tiene límites físicos en cuanto a la máxima y mínima capacidad de almacenamiento.

Nodos: Corresponden a puntos donde los flujos de agua son tanto mezclados como propagados, propagación indica que el flujo tiene una entrada y múltiples salidas, por otro lado la mezcla de uno o más flujos de entrada se puede propagar en uno o más flujos de salida. Los nodos representan conexiones en la red y relaciones de balanceo de masas entre entradas y salidas de flujo.

Estaciones de bombeo: Las estaciones de bombeo son necesarias para llevar el agua que no puede fluir por gravedad. Las bombas que se presentan en las redes de distribución de agua son de dos tipos:

- Aquellas que extraen el agua de fuentes subterráneas.
- Aquellas que se usan para llevar el agua donde hay una diferencia de alturas entre dos elementos diferentes.

Válvulas: Una válvula es un dispositivo que regula el flujo de agua abriendo, cerrando, o parcialmente obstruyendo varios pasajes. Son técnicamente accesorios de las tuberías pero se discuten en categorías diferentes, pueden ser operadas manualmente utilizando un volante, palancas o pedales. También pueden ser automáticas manejadas con cambios de presión, temperatura o flujo. Algunos sistemas de control más complejos utilizan válvulas que requieren control automático basado en entradas externas (por ejemplo regular el flujo a través de una tubería cambiando la referencia), para lo cual se necesita un actuador. El actuador cerrará la válvula dependiendo de la entrada y de la referencia, permitiendo que la válvula se posicione con precisión y dando pie a tener un control con una variedad de requerimientos.

3.1.2 Modelado de redes de distribución de agua potable

El enfoque de modelado del estudio presentado en [15] se basa en un modelo de “sólo flujo”, donde sólo se requieren las variables de control para calcular el cambio en el estado de la red producido por la acción de control. El modelo sólo considera la ley de la conservación de la masa relacionada con los flujos de agua, por lo que las ecuaciones que describen el sistema dinámico son lineales.

Aspectos generales

- *Tanques:* El volumen de agua en el tanque representa la variable de salida en el modelo.
- *Actuadores:* El flujo manipulado a través del actuador representa la variable de entrada de control del modelo, tanto las bombas como las válvulas tienen límites mínimos y máximos, que también son restricciones del modelo.
- *Nodos o uniones:* Puntos donde el flujo de agua se mezcla o propaga, se modelan como restricciones de igualdad relacionadas con la entrada y salida de flujo de los nodos.
- *Nodos de demanda o Sectores de consumo:* representan la demanda de agua hecha por los usuarios de la red, se consideran como perturbaciones conocidas en el modelo, ya que existe un conjunto de perfiles que pronostican el comportamiento de la demanda caracterizada, usando un enfoque estadístico, ver [16] y [17].

Modelado con ecuaciones

Siendo:

x_i : Volumen asociado al i -ésimo tanque.

u_i : Flujo a través del i -ésimo actuador.

d_i : Demanda de agua asociada al i -ésimo sector de consumo.

Δt : Tiempo de muestreo.

Se introducen los siguientes modelos elementales:

Tanque:

$$x_i(k + 1) = x_i(k) + \Delta t(\sum_i q_{in,i}(k) - \sum_j q_{out,j}(k)) \quad (6)$$

Donde $q_{in,i}(k)$ y $q_{out,j}(k)$ corresponden al i -ésimo flujo de entrada y el j -ésimo flujo de salida respectivamente.

$$x_i^{min} \leq x_i(k) \leq x_i^{max}, \quad (7)$$

Donde x_i^{min} y x_i^{max} representan la mínima y máxima capacidad en volumen respectivamente, en m^3 .

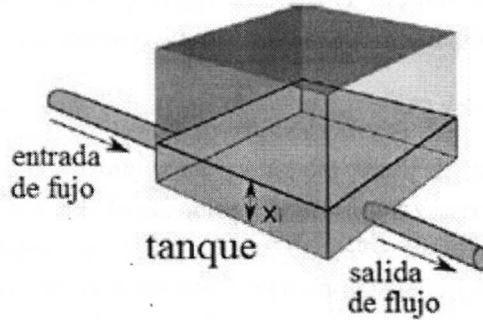


Fig. 1 Esquema de un tanque de almacenamiento de la red.

Nodo sin demanda:

Este elemento puede tratarse como una relación de balanceo de masas, es simplemente una igualdad flujo entrante y saliente:

$$\sum_i q_{in,i}(k) = \sum_j q_{out,j}(k) \quad (8)$$

Donde $q_{in,i}(k)$ y $q_{out,j}(k)$ representan la i -ésima entrada y la j -ésima salida de flujo respectivamente, dadas en m^3/seg .

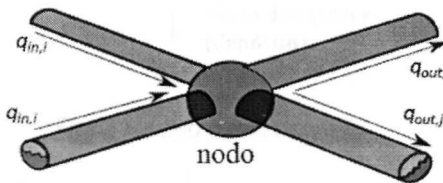


Fig. 2 Esquema de un nodo sin demanda en la red.

Depósito

De acuerdo con [18] se utilizan relaciones algebraicas para derivar el modelo estático de pipas, válvulas y estaciones de bombeo, así como ecuaciones diferenciales para el modelo dinámico de los depósitos. Los elementos pasivos (tuberías y válvulas) disipan la energía y los elementos activos (bombas) proveen de energía a la red; en este caso se considera un sistema compuesto por tuberías, válvulas de control, estaciones de bombeo, estaciones de tratamiento de agua y consumidores, los cuales constituyen los elementos del sistema. Las mediciones físicas utilizadas para describir el comportamiento de los elementos, son el flujo y la columna de agua (en lugar de la presión). Los elementos están interconectados para formar una red compuesta por nodos y ramas,

donde las bombas, tuberías y válvulas constituyen la red de ramas, mientras que los depósitos se consideran como nodos. Los consumos se representan de acuerdo a los vectores de flujo d , d_r asignados a los no depósitos y depósitos respectivamente. Se denotan como b el número total de ramas, y por n , n_r , n_c y n_f el número total de nodos, nodos de reserva (depósitos) nodos de unión y nodos de altura fija respectivamente. Donde: $n = n_r + n_c$.

Puede haber entrada adicional de flujo $q_{out,i}$ diferente de $q_{s,i}$ donde $q_{s,i}$ y $q_{out,i}$ representan el i -ésimo componente del vector q_s y q_{out} , dentro del i -ésimo depósito, viniendo del ambiente externo. Se denotará como $q_{lr,i}$ la carga total asignada al i -ésimo depósito. Por lo tanto:

$$q_{lr,i} = q_{s,i} - d_{r,i} + q_{out,i} \text{ Para } i = 1, \dots, n_r \quad (9)$$

Donde: $d_{r,i}$ representa el i -ésimo componente del vector de demandas de depósito d_r , y n_r es el número de depósitos. Para escribir la ecuación (9) en forma vectorial se necesita de una matriz de incidencia. En la Fig. 3 se muestra el modelo de un depósito. Es necesario definir las direcciones de flujo al momento de formular modelos de estos elementos, siendo i y j los nodos origen y destino respectivamente, el flujo correspondiente es q_{ij} . Cuando se supone un sentido de flujo que en la realidad es contrario, se obtendrán flujos negativos.

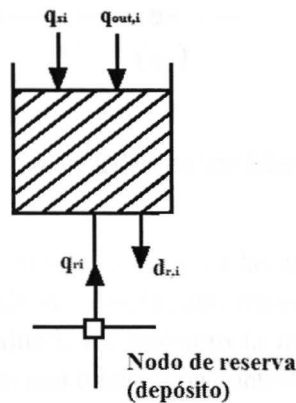


Fig. 3 Modelo de un depósito

Tuberías

La relación columna de agua-flujo para una tubería puede escribirse como:

$$q_{ij} = \Phi_{ij}(h_i - h_j) \quad (10)$$

Nótese que los efectos de inercia en la masa del agua son despreciados. De acuerdo a la fórmula de Hazen-Williams:

$$\Phi_{ij}(h_i - h_j) = G_{ij}(h_i - h_j)|h_i - h_j|^{-0.46} \quad (11)$$

Nótese que la dirección de flujo positivo es del nodo de mayor al de menor altura. El coeficiente G_{ij} representa la conductividad de la tubería (i, j) . La caída de altura $h_i - h_j$ en la tubería (i, j) puede calcularse fácilmente mediante:

$$h_i - h_j = g_{ij}(q_{ij}) = R_{ij}q_{ij}|q_{ij}|^{0.852} \quad (12)$$

Donde R_{ij} es la resistencia de la tubería. El flujo q_{ij} es también llamado descarga del nodo i al nodo j .

Nuevamente de acuerdo a la formula de Hazen-Williams:

$$R_{ij} = (1.21216 \times 10^{10} \times L_{ij}) / (C_{ij}^{1.852} \times D_{ij}^{4.87}) \quad (13)$$

Donde: L_{ij} , D_{ij} y C_{ij} representan la longitud de la tubería, diámetro y coeficiente.

La descarga se puede representar como: q_l donde l se refiere al número de elemento, mientras que la función $\Phi_{ij}(\cdot)$ se representará como $\Phi_l(\cdot)$. La Fig. 4 ofrece una ilustración gráfica de lo anterior.

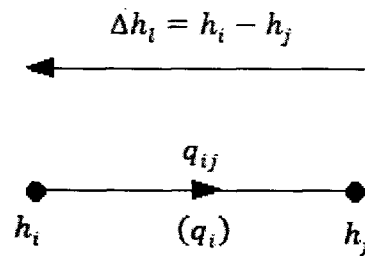


Fig. 4 Modelo de una tubería.

Válvulas

Existe una gran variedad de válvulas usadas en las redes de agua, para realizar diferentes funciones, como pueden ser: modulación de presión, anti retorno, reducción de presión, reducción de flujo, control variable, y control de altura, sin embargo la modelación se limita a las válvulas de control variable, estas se modelan como una tubería con control de conductividad, esto es:

$$q_{ij} = V_{ij}G_{ij}(h_i - h_j)|h_i - h_j|^{-0.46} \quad (14)$$

Donde V_{ij} representa el factor de control en la válvula, la válvula está cerrada si $V_{ij} = 0$ y completamente abierta si $V_{ij} = 1$ como se muestra en la Fig. 5.

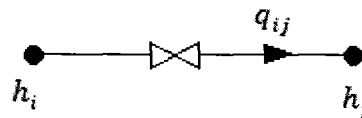


Fig. 5 Tubería equipada con una válvula.

Bombas

Son típicamente electrónicas y pueden incluir bombas de velocidad fija (*FSP*), bombas de velocidad variable (*VSP*) y bombas de flujo variable (*VTP*). Las bombas hidráulicas son generalmente

no lineales, las bombas paralelas se pueden modelar con un factor de control entero cuyo valor indica el número de bombas encendidas dentro del mismo grupo. Por lo tanto para un grupo de bombas en paralelo y con las mismas características hidráulicas, se tiene lo siguiente:

$$\Delta h = g^f(q, u) \quad (15)$$

Donde u representa el número de bombas encendidas $u = 1, \dots, U$, q es el flujo de la bomba y Δh es el incremento de flujo a través del grupo.

La carga q es del nodo de origen del grupo de bombas al grupo destino. Las alturas del nodo de la bomba son llamadas altura de succión h_s , y la altura de distribución h_d respectivamente. Por lo tanto:

$$\Delta h = h_d - h_s \quad \text{donde } h_d \geq h_s \quad (16)$$

La función $g^f(\cdot)$ al ser no lineal puede ser aproximada como:

$$g^f(q, u) = \begin{cases} A \left(\frac{q}{u}\right)^2 + B \left(\frac{q}{u}\right) + C & \text{si } u \neq 0 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (17)$$

Si la velocidad de la bomba puede ser controlada continuamente, las características son las siguientes:

$$\Delta h = g^s(q, u, s) \quad (18)$$

Donde s representa la velocidad de la bomba y se define como:

$$s = \frac{\text{velocidad de operación}}{\text{velocidad nominal}}$$

Y de la misma manera la aproximación puede realizarse como se ve a continuación:

$$g^s(q, u, s) = \begin{cases} A \left(\frac{q}{u}\right)^2 + B \left(\frac{q}{u}\right) s + Cs^2 & \text{si } u \neq 0 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (19)$$

Por lo tanto:

$$q = \Phi(\Delta h, u, s) \quad (20)$$

Finalmente para un grupo de bombas en el que se tiene flujo variable, se tiene:

$$\Delta h = g(q, u) - \Delta h^t(q, v)$$

El primer término de la ecuación representa el incremento de altura, mientras que el segundo término representa la caída de altura a través de la conductividad del flujo. La estructura general para una estación de bombeo que se compone de todos los tipos de bombas se ilustra en la Fig. 6, en la cual se tiene un total de M_i^f diferentes grupos de bombas de velocidad fija, M_i^t grupos de bombas de flujo variable y M_i^s grupos de bombas de velocidad variable. El flujo de bombeo se denota por q_i .

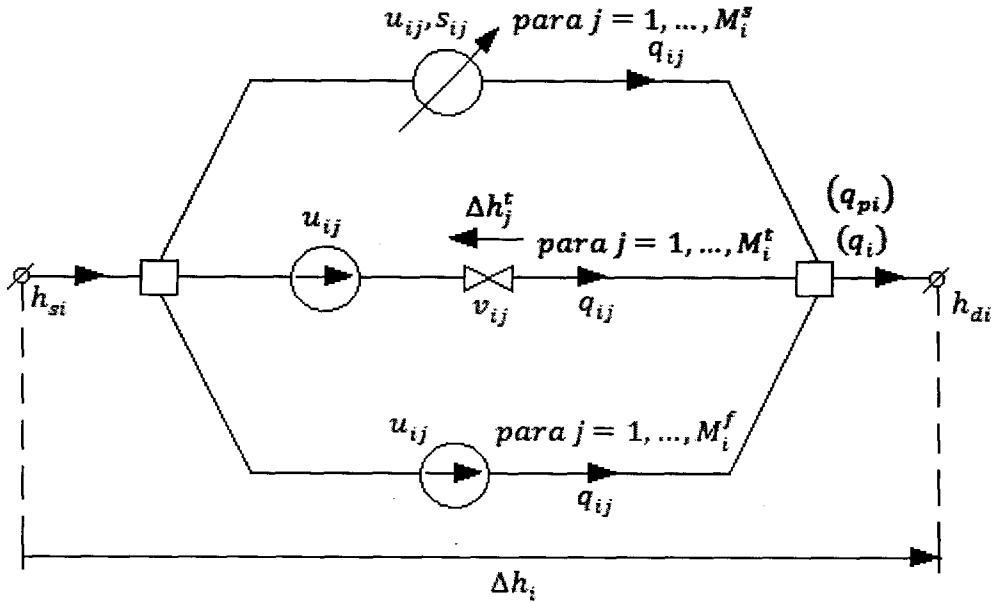


Fig. 6 Configuración generalizada de una i -ésima estación de bombeo

Ley de continuidad de flujo

Para cada nodo de unión j , como puede verse en la Fig. 7(a) se tiene:

Fig. 7(a) se

$$\sum_{i \in J_j} q_{ij} = d_j \quad (21)$$

Donde J_j representa el conjunto de nodos, vinculados con el nodo j y d_j es el j -ésimo componente del vector de demanda global de la red de depósitos que están asignados al j -ésimo nodo de unión.

Se define una matriz de incidencia para los nodos de unión con el fin de escribir la ecuación (22) en forma matricial. Es conveniente identificar las ramas con números subsecuentes como se muestra en la Fig. 7(b). Cada elemento de la i -ésima columna y el j -ésimo renglón de la matriz de incidencia Λ_c se define como sigue:

$$a_{ji} = \begin{cases} 1 & \text{si el flujo de la rama } i \text{ entra en el nodo } j \\ 0 & \text{si la rama } i \text{ y el nodo } j \text{ no están conectados} \\ -1 & \text{si el flujo de la rama } i \text{ sale del nodo } j \end{cases} \quad (22)$$

La matriz mencionada queda de la siguiente manera:

$$\Lambda_c q = d \quad (23)$$

Donde $q = (q_1, \dots, q_b)^T$ es el vector de flujo en las ramas, d representa un vector de demanda aumentado por componentes de cero correspondientes a los nodos no cargados.

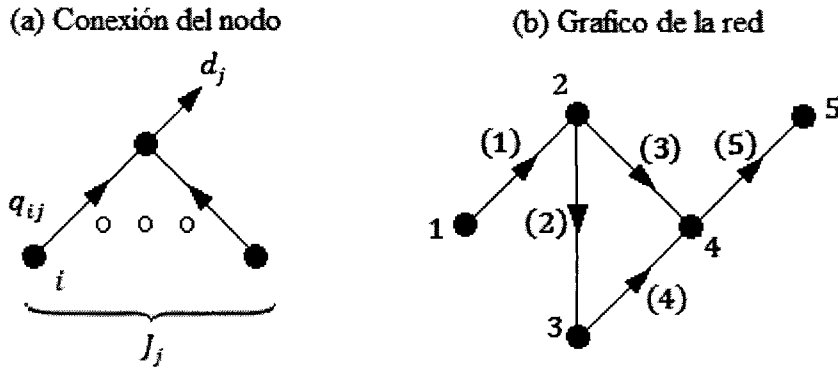


Fig. 7 Estructura de la red

Modelado de los nodos

No es posible determinar cada uno de los flujos q para una demanda dada d utilizando únicamente la ecuación (23), se necesitan otras $b - n_c$ ecuaciones relacionadas a los flujos de la tubería, pudiendo ser utilizadas las ecuaciones (14), (15), (16) y (20), por ser relaciones de flujo-altura de los elementos de la red. Añadiendo las ecuaciones al vector de flujo se obtienen $n_c + b$ ecuaciones, que sin embargo darán un conjunto de cantidades desconocidas que son las alturas de los nodos.

Para la i -ésima tubería conectada al l -ésimo nodo de reserva como destino, siendo el j -ésimo nodo de no reserva el origen, se tiene:

$$h_j - h_{r,l} = g_{jl}(q_{jl}) = R_{jl}q_{jl}|q_{jl}|^{0.852} = R_i q_i |q_i|^{0.852} = g_i(q_i) \quad (24)$$

Donde: $q_{jl} = q_i$, $R_{jl} = R_i$ y $g_{jl}(\cdot) = g_i(\cdot)$

Para la i -ésima estación de bombeo compuesta sólo por bombas de velocidad fija, y bombeo del l -ésimo nodo de reserva al j -ésimo nodo, se tendría:

$$\begin{aligned} h_{r,j} - h_{r,l} &= g_i^f(q_{lj}, u_i) \\ &= A_i \left(\frac{q_{lj}}{u_i}\right)^2 + B_i \left(\frac{q_{lj}}{u_i}\right) + C_i \\ &= g_i^f(q_i, u_i) \end{aligned} \quad (25)$$

Para la i -ésima conexión de la válvula del j -ésimo nodo al l -ésimo nodo:

$$\begin{aligned} h_j - h_l &= g_{jl}(q_{jl}, v_{jl}) = R_{jl}(v_{jl})q_{jl}|q_{jl}|^{0.852} \\ &= R_i(v_i)q_i|q_i|^{0.852} = g_i(q_i, v_i) \end{aligned} \quad (26)$$

Se define la matriz de incidencia Λ de n renglones y b columnas, de la siguiente manera:

$$b_{ij} = \begin{cases} -1 & \text{si la rama } i \text{ sale del nodo } j \\ 0 & \text{si no hay conexión entre la rama } i \text{ y el nodo } j \\ 1 & \text{si la rama } i \text{ entra al nodo } j \end{cases} \quad (27)$$

Con ayuda de la matriz Λ se pueden escribir las ecuaciones de flujo-altura como una ecuación de vectores:

$$\Lambda^T \begin{bmatrix} h_r \\ h \end{bmatrix} + G(q) = 0 \quad (28)$$

Donde:

$$h_r = (h_{r1}, \dots, h_{r,n_r})^T \text{ - vector de alturas de los nodos de reserva} \quad (29)$$

$$h = (h_1, \dots, h_{n_c})^T \text{ - vector de alturas de los nodos de unión} \quad (30)$$

$$q = (q_1, \dots, q_b)^T \text{ - vector de flujo en las ramas} \quad (31)$$

$$G(q) = (g_1(q_1), \dots, -g_i^f(q_i, u_i), \dots, -g_j^s(q_j, s_j, u_j), \dots, g_1(q_1 v_1), \dots)^T \text{ - vector de funciones que definen la relación altura-flujo de las ramas} \quad (32)$$

Las ecuaciones (23) y (28) juntas, constituyen el modelado de los nodos de la red.

La matriz Λ puede dividirse como:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \Lambda_r \\ \Lambda_c \end{bmatrix} \quad (33)$$

Donde Λ_c se utiliza en la ecuación (23), mientras que Λ_r representa la matriz de incidencia definida para los nodos de reserva. Por lo tanto:

$$[\Lambda_r^T \quad \Lambda_c^T] \begin{bmatrix} h_r \\ h \end{bmatrix} + G(q) = 0 \quad (34)$$

Que combinada con la ecuación (28) entrega el modelo de los nodos:

$$\left. \begin{array}{l} \Lambda_c q = d \\ \Lambda_c^T h + G(q) = -\Lambda_c^T h_r \end{array} \right\} \quad (35)$$

Λ_r , puede usarse para obtener el vector de flujos de los depósitos dado el vector de flujo en las ramas llamado:

$$q_r = \Lambda_r q \quad (36)$$

Se aplica la ley de continuidad de flujo únicamente para aquellos nodos cuyas alturas son desconocidas, consecuentemente la matriz de incidencia Λ_c se designa únicamente para los nodos con altura no conocida, y se define h_f como el vector de alturas fijas, donde:

$$h_f = (h_{f,1}, \dots, h_{f,n_f})^T \quad (37)$$

Sólo las ramas cuyos flujos son no conocidos se consideran que producen un modelo de nodo, por lo que Λ_f es una generalización de la matriz Λ_r y el modelado de los nodos se escribe como:

$$\Lambda_c q = d \quad (38)$$

$$\Lambda_c h + G(q) = -\Lambda_f^T h_r \quad (39)$$

Dónde q, h representan vectores de flujos y alturas desconocidas respectivamente, mientras que d representa el vector de demandas incluyendo flujos de ramas conocidos.

4. Epanet

4.1 Introducción al uso del software





Con el objetivo de satisfacer los requerimientos de las normativas [2], así como los deseos de los usuarios, las compañías que gestionan los servicios de agua han manifestado una necesidad creciente por comprender mejor el avance y las transformaciones que experimenta el agua tratada, cuando se introduce en las redes de distribución. EPANET es un modelo de simulación por computadora que ayuda a cumplir este objetivo. Predice el comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en un sistema de distribución de agua durante periodos de operación prolongados.

EPANET es un programa orientado al análisis del comportamiento de los sistemas de distribución de agua y el seguimiento de la calidad del agua en los mismos, que ha tenido una gran aceptación en España, y en todos los países de habla hispana, desde su lanzamiento en Europa en Septiembre de 1993. Ello se debe principalmente al excelente trabajo realizado por su autor L. Rossman, quien ha sabido conjugar los algoritmos de cálculo más avanzados con una interfaz gráfica potente y amigable.



Entre la multitud de aplicaciones de EPANET cabe destacar la planificación de mejoras en las redes, el trazado y selección de nuevos elementos, la detección de los 'cuellos de botella' de la red, la evaluación de la calidad y tiempo de vida de los materiales, la regulación de las presiones en la red, la reducción de los costes de operación, la regulación del uso de los depósitos para reducir los tiempos de retención del agua, la previsión de la respuesta de la red ante la clausura de un punto de alimentación o la incorporación de nuevas urbanizaciones, la planificación de actuaciones en casos de emergencia, como la entrada de un contaminante no controlado, la localización de estaciones de reclusión, la sectorización de la red para el control de fugas, etc.

4.2 Descripción del área de trabajo

Epanet reconoce 6 tipos de objetos que intervienen en una red [20], con los cuales es posible dibujar y hacer funcionar la red. Dichos objetos se presentan a continuación:


-  **Nodo:** Es un punto con cota determinada, por medio del cual el agua sale de la red. Esta salida se hace asignándole una demanda o consumo. Al asignar una demanda negativa, se convierte en un punto de entrada. En los nodos se conoce la demanda y se desconoce la presión.
-  **Embalse:** El embalse actúa de sumidero o fuente de agua, su tamaño no varía con las entradas y salidas de agua, ya que se supone muy grande en comparación al sistema, como pueden ser ríos, lagos, mantos subterráneos, etc.
-  **Depósito:** Es un nodo con capacidad limitada de almacenar agua.
-  **Tubería:** Es la que transporta el agua de una parte a otra del sistema. EPANET asume que siempre están llenas, además usando sus propiedades se puede abrir, cerrar o limitar el flujo


sin necesidad de usar válvulas. Las tuberías disipan la energía que tiene el agua en virtud de su altura o presión por rozamiento.


-  **Bomba:** Son aquellas encargadas de comunicar energía al agua, es decir, la impulsan. Sin embargo es recomendable evitar utilizarlas en el programa a medida que esto sea posible.
-  **Válvulas:** Existen varios tipos de ellas dentro de Epanet:
 - **Válvula reductora:** Disminuye la presión aguas abajo.
 - **Válvula sostenedora:** Mantiene la presión aguas arriba.
 - **Válvula de ruptura:** Fuerza una caída determinada de presión.
 - **Válvula limitadora de caudal.**
 - **Válvula de propósito general o válvula genérica,** cuyo comportamiento es programado por el usuario.


La pantalla que se muestra al usuario es la siguiente:

- BARRA DE HERRAMIENTAS:** La barra de herramientas disponible se muestra en la Fig. 8, en ella se tienen las opciones acostumbradas en el ambiente Windows, así como los objetos mencionados anteriormente. La barra cuenta también con opciones importantes dentro de la simulación de la red de agua:

 **Iniciar Análisis** (simulación). Una vez que se haya construido la red, es posible realizar un análisis sobre el comportamiento detallado de la misma dependiendo de los parámetros indicados, y con esto obtener resultados.

 **Consultas.** Cuando se tiene una red, es posible encontrar nodos o líneas con características específicas.

 **Gráficos.** Al término del análisis, una opción muy funcional, es la de obtener gráficos del comportamiento de la presión de los nodos presentes en la red, o los flujos que atraviesan las tuberías.

 **Tablas.** De la misma manera que puede ser útil graficar, puede resultar muy conveniente obtener tablas de los resultados obtenidos.


 **Opciones.** En este apartado es posible definir opciones como tamaño de nodos, flechas, etiquetas en los elementos de la red, color de fondo, etc.



Fig. 8 Barra de herramientas Epanet

- ESPACIO DE TRABAJO:** En la Fig. 9 se muestra el espacio en el que se trabaja dentro del programa, así como un ejemplo de una red construida en el mismo, como puede verse, es posible definir colores de acuerdo al flujo y presión presentes en la red, de modo que se identifique fácilmente en cuales de los nodos la presión es baja, o aquellas tuberías en las que el flujo es muy escaso.

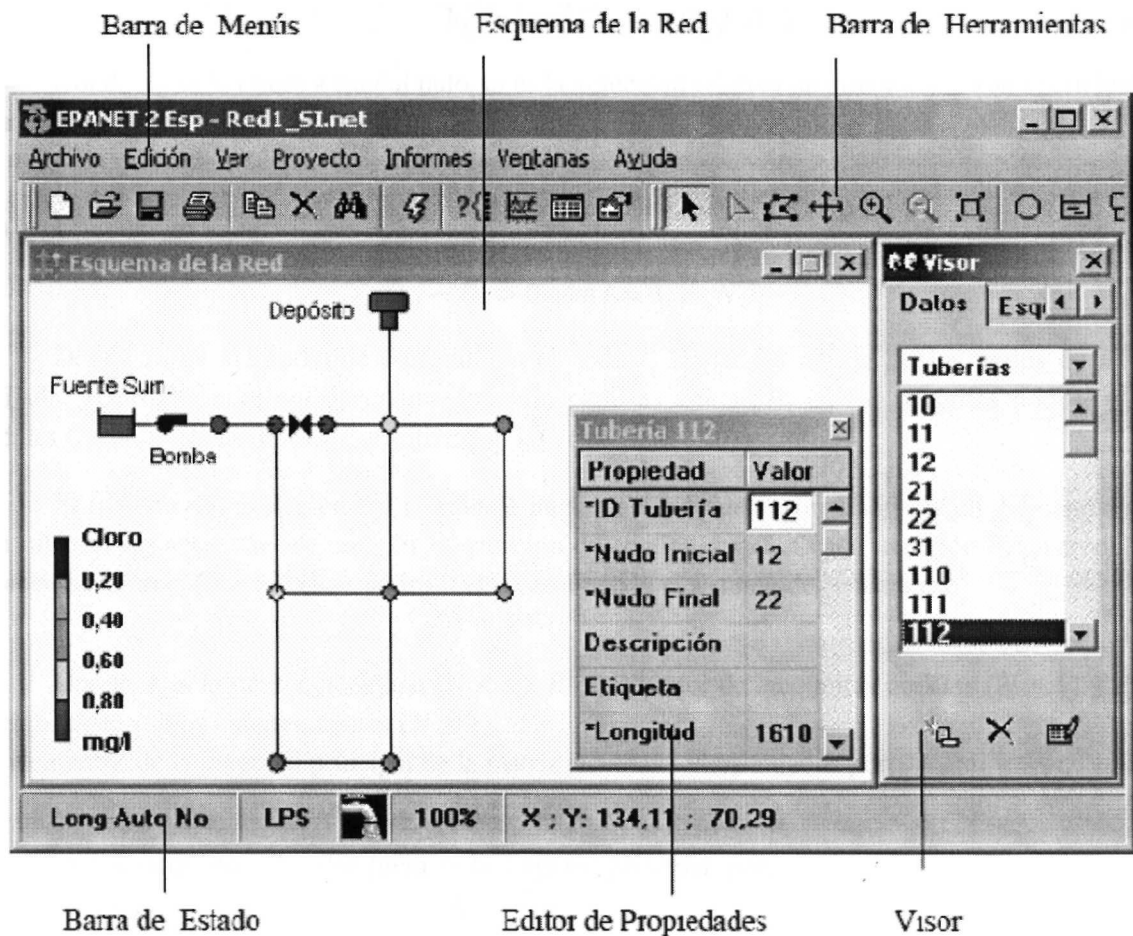


Fig. 9 Entorno de trabajo básico en EPANET

4.3 Análisis hidráulico en Epanet

Para resolver las ecuaciones de continuidad de los nodos y las ecuaciones de comportamiento hidráulico de las tuberías, EPANET utiliza el método descrito en [21], por ser el más sencillo, el cual se describe a continuación:

Teniendo una red de tuberías con N nodos de caudal y NF nodos de altura conocida (embalses y depósitos). La relación entre la pérdida de carga para una tubería que va del nodo i al nodo j y el caudal de paso puede escribirse como:

$$H_i - H_j = h_{ij} = rQ_{ij}^n + mQ_{ij}^2 \quad (40)$$

Donde H es la altura piezométrica del nodo, h es la pérdida de carga, r es el coeficiente de resistencia, Q es el caudal, n es el exponente del caudal y m el coeficiente de pérdidas menores. El valor del coeficiente de resistencia depende de la fórmula utilizada para el cálculo de pérdidas, lo cual se analizará más adelante. Para las bombas, la pérdida puede presentarse mediante la fórmula:

$$h_{ij} = -\omega^2(h_0 - r(Q_{ij}/\omega)^n) \quad (41)$$

Donde h_0 es la altura a caudal nulo, ω es la velocidad relativa de giro y r y n son coeficientes de la curva de la bomba.

El segundo sistema de ecuaciones a cumplir está configurado por la condición de equilibrio para los caudales en todos los nodos:

$$\sum_j Q_{ij} - D_i = 0 \text{ para } i = 1, \dots, N \quad (42)$$

Donde D_i es el caudal de demanda en el nodo i . Dadas las alturas en los nodos de altura prefijada, el problema es encontrar una solución para las alturas H_i en los restantes nodos, y los caudales Q_{ij} en todas las líneas, que satisfagan las ecuaciones (40) y (42).

El método de resolución del Gradiente inicia haciendo una estimación inicial del caudal por cada tubería, sin necesidad de cumplir la ecuación de continuidad. En cada iteración del método, se obtienen las alturas piezométricas en los nodos resolviendo el sistema de ecuaciones:

$$A = HF \quad (43)$$

Donde A es la matriz jacobiana ($N \times N$), H es el vector de incógnitas nodales ($N \times 1$) y F es el vector de términos independientes ($N \times 1$).

Los elementos de la diagonal principal de la matriz jacobiana vienen dados por:

$$A_{ii} = \sum_j p_{ij} \quad (44)$$

Y los elementos no nulos fuera de la diagonal principal, por:

$$A_{ij} = -p_{ij} \quad (45)$$

Donde p_{ij} es la inversa de la derivada respecto al caudal, de la pérdida de carga en la línea que va del nodo i al j . Su expresión para las tuberías es:

$$p_{ij} = \frac{1}{nr|Q_{ij}|^{n-1} + 2m|Q_{ij}|} \quad (46)$$

Y para las bombas:

$$p_{ij} = \frac{1}{n\omega^2 r(Q_{ij}/\omega)^{n-1}} \quad (47)$$

Los términos independientes se constituyen por el caudal residual no equilibrado en el nodo, más un factor de corrección dado por:

$$F_i = (\sum_j Q_{ij} - D_i) + \sum_j y_{ij} + \sum_f p_{if} H_f \quad (48)$$

Donde el último termino está presente sólo para las tuberías que unen el nodo i con el nodo de altura conocida f ; por su parte el factor de corrección del caudal y_{ij} tiene por expresión:

$$y_{ij} = p_{ij} \left(r|Q_{ij}|^n + m|Q_{ij}|^2 \right) \text{sgn}(Q_{ij}) \quad (49)$$

para las tuberías, donde $\text{sgn}(x)$ es 1 si $x > 0$ y -1 en otro caso, y:

$$y_{ij} = -p_{ij}\omega^2(h_0 - r(Q_{ij}/\omega)^n) \quad (50)$$

para las bombas (Q_{ij} es siempre positivo en este caso).

Una vez calculadas las nuevas alturas, los nuevos caudales se obtienen mediante:

$$Q_{ij} = Q_{ij} - (y_{ij} - p_{ij}(H_i - H_j)) \quad (51)$$

Si la suma extendida a todas las líneas de la variación de caudal, es mayor que cierta tolerancia establecida, las ecuaciones (43) y (51) se resuelven de nuevo. La fórmula de actualización (42) conduce al equilibrio de los caudales en los nodos tras la primera iteración.

El sistema de ecuaciones lineales (44) se resuelve de acuerdo a [22]. El coeficiente de pérdida de una tubería (r) se calcula según las formulas de la Tabla 2.

Fórmula	Coefficiente de Resistencia (A)	Exponente de Caudal (B)
Hazen-Williams	$10.674C^{-1.852}d^{-4.871}L$	1.852
Darcy-Weisbach	$0.0827f(\varepsilon, d, q)d^{-5}L$	2
Chezy-Manning	$10.294n^2d^{-5.33}L$	2
Donde: C= Coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams ε = Coeficiente de rugosidad de Darcy-Weisbach (m) f = factor de fricción (depende de ε , d y q) n = Coeficiente de rugosidad de Manning d = diámetro de la tubería (m) L =longitud de la tubería (m) q = Caudal (m^3/seg)		

Tabla 2 Fórmulas de pérdida de carga para tubería llena

5. Experimentación

Como se ha explicado en capítulos anteriores, se pretende encontrar una manera de detectar, aislar e identificar fugas en una red hidráulica, de acuerdo a las variaciones en las mediciones de presión en los nodos que la conforman. Consideraremos como fuga aquella consecuencia de pérdida de caudal de agua a través de un defecto del elemento de la red que está siendo medido. Todos los escenarios que se van a simular contemplan la existencia de una sola fuga a la vez en cualquier nodo de la red.

El diagrama de detección se muestra en la Fig. 10, donde puede verse que el proceso que se sigue para realizar el aislamiento de una fuga presente en la red, este diagrama se cumple independientemente del método que esté siendo utilizado.

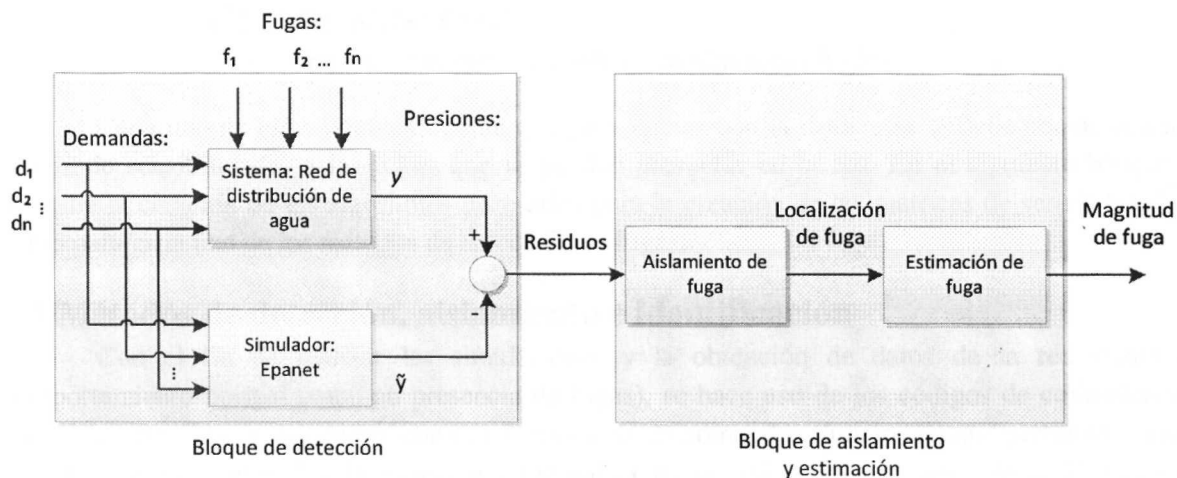


Fig. 10 Diagrama de detección, aislamiento y estimación de fugas mediante simulación

Para la experimentación se tomó la decisión de modelar las fugas en los nodos, es decir poniendo una demanda extra de la existente en el nodo en cuestión. Para esto fue necesario contar con 2 patrones de demandas para la red a considerar, estos patrones corresponden al tipo de demanda con el que se esté trabajando, para las demandas base, se tiene un patrón de comportamiento nominal, es decir, el que se espera que ocurra de acuerdo a los datos históricos que se tienen de la red. El segundo patrón obedece al comportamiento que tendrá la fuga, debido a que se considerará constante la fuga durante el periodo de tiempo medido, el segundo patrón tendrá una constante de 1 para todas las horas del período lo que significa que en vez de establecer un patrón de demanda variante en el tiempo, se considerará que la fuga será la misma a lo largo del horizonte de tiempo que se plantea.

Se realizó la comparación de 5 métodos principales de detección, que están basados en métodos conocidos de análisis de datos [26, 27], con la finalidad de comparar la eficiencia de cada uno de ellos ante cambios en magnitudes de fuga y efectos de ruido en mediciones y demandas. Cada uno de los métodos mencionados se agrupa en un algoritmo, el cual se basa en el análisis de los datos obtenidos mediante simulación hidráulica. En este algoritmo en vez de tomar en cuenta únicamente el instante de tiempo actual, se analiza el comportamiento completo en un horizonte de tiempo, dicho

horizonte puede ser de cualquier tamaño, dentro del análisis hecho en éste trabajo, se toma en cuenta un horizonte de tiempo de 24 horas para cada una de las redes, es decir de tamaño igual al patrón de demanda cambiante conocido, sin embargo no afecta de ninguna manera si se decide tomar un horizonte mayor o menor al que se estudia en este caso, lo cual favorece el análisis de las variaciones ocasionadas por los cambios en la demanda durante el día.

Los métodos mencionados se dividen en los grupos que se muestra a continuación:

- a. MÉTODOS DIRECTOS
 - i. Binarizados
 - ii. No binarizados
 - Basado en la correlación de los residuos obtenidos
 - Basado en la distancia euclidiana entre los vectores de residuos
 - Basado en el ángulo formado por los vectores de residuos
- b. MÉTODOS INDIRECTOS
 - i. Optimización por el método de mínimos cuadrados

Cada uno de ellos tiene en común que para iniciar con la detección se debe contar con una matriz de sensibilidades a las fugas que se puedan presentar en la red. En el siguiente bloque se describe la creación de los algoritmos necesarios para la creación de las matrices de sensibilidad así como para cada uno de los métodos de detección de fugas.

5.1 Métodos de detección, aislamiento e identificación

Con el fin de realizar las simulaciones y la obtención de datos de la red (tanto en comportamiento normal como en presencia de fugas), se hace uso de los códigos de comunicación entre Matlab y Epanet, los cuales constan de una serie de comandos (funciones) que permiten realizar cambios de parámetros en la simulación hidráulica de la red de distribución desde el panel de programación de Matlab, dichos comandos fueron proporcionados por el grupo de investigación de Sistemas Avanzados de Control de la UPC.

5.1.1 Algoritmo de construcción de las matrices de sensibilidad

El presente algoritmo se divide principalmente en 3 partes:

- Construcción del escenario de funcionamiento normal de la red, es decir, aquel en el que no se presentan fugas, del cual se obtienen 3 matrices, una de acuerdo a la presión en cada nodo de la red, la segunda de acuerdo a la demanda de los mismos, y la última representando el flujo en cada tubería, en el presente trabajo, se utilizan únicamente las presiones de los nodos para la detección de las fugas, por lo tanto son las que se muestran a continuación:

$$P = \begin{bmatrix} p_{1,1} & \cdots & p_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n,1} & \cdots & p_{n,m} \end{bmatrix} \quad (52)$$

Donde:

n = número de nodos de la red

$m =$ muestreos durante el tiempo de simulación

- Construcción de los escenarios de funcionamiento con presencia de fugas (se obtiene una matriz para cada una de las fugas probables en la red, es decir tomando en cuenta que es posible que la fuga se presente en cualquiera de los nodos que conforman la red). Cada una de las matrices queda de la siguiente manera:

$$P_{fuga_i} = \begin{bmatrix} p_{1,1} & \cdots & p_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n,1} & \cdots & p_{n,m} \end{bmatrix} \quad (53)$$

Donde:

$i =$ número de fugas posibles en la red.

- Obtención de residuos para cada una de las matrices obtenidas en el punto anterior. Entiéndase como residuos la diferencia de presión para cada nodo del sistema contra la presión en funcionamiento normal.

$$\mathcal{R}_i = P - P_{fuga_i} \quad (54)$$

Si es necesario aislar el tamaño de la fuga que se está suponiendo para cada posible ocurrencia, entonces los residuos se convierten en sensibilidades para cada nodo, donde:

$$S_i = \frac{P - P_{fuga_i}}{l} \quad (55)$$

Donde:

$l =$ tamaño de la fuga supuesta en litros por segundo

Para el caso en cuestión, $i = 31$ posibles fugas (una por cada nodo de la red), $n = 31$ nodos (considerando que todos puedan ser medidos) y $m = 97$ muestreos en la simulación.

Al término de las partes descritas es necesario hacer una transformación de los datos, es decir, hasta este punto se tienen un total de n matrices de fugas posibles, donde cada una de ellas contiene los residuos de cada nodo para cada hora del día, y se requiere tener un total de m matrices de acuerdo al total de tiempos de muestreo, donde cada una de ellas representa la diferencia de presión en cada nodo de acuerdo a la posible fuga que se presenta. Los residuos separados por tiempo de muestreo quedan de la siguiente manera:

$$S_m = \begin{bmatrix} S_1(1, m) & \cdots & S_i(1, m) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_1(n, m) & \cdots & S_i(n, m) \end{bmatrix} \quad (56)$$

$$m = 1 \dots 97, n = 1 \dots 31, i = 1 \dots 31$$

Una vez obtenidas las matrices de sensibilidad de acuerdo al tiempo de muestreo establecido según el patrón de comportamiento, se guardan las matrices dentro de una estructura, y a su vez en un archivo llamado *res_muestra.mat* que podrá ser leído desde los siguientes algoritmos. El número de matrices de sensibilidad indica la ventana de tiempo con la que habrá de trabajarse en caso de ser

necesaria una simulación de fugas en línea, la cual tendrá una duración no conocida, por lo cual será necesario trasladar la ventana de análisis de acuerdo al tiempo establecido en las matrices de sensibilidad. La creación de dichas matrices se observa mejor en la Fig. 11.

5.1.2 Algoritmo de detección, aislamiento e identificación de fugas por los distintos métodos propuestos

5.1.2.1 Método de binarización de matrices

Para el método de binarización, se sigue el procedimiento descrito a continuación:

- a) Binarizar las matrices de sensibilidad de acuerdo al umbral establecido, para el caso actual, se eligió un umbral de 0.95, es decir, si el elemento de la matriz de sensibilidad correspondiente es mayor o igual al 95% del valor máximo que se tiene en la matriz de binarización, este elemento tomará un valor de 1, de lo contrario, el valor será 0.
- b) Extraer los residuos actuales de acuerdo a la simulación hidráulica, dichos residuos habrán de recibir el mismo tratamiento que las matrices de sensibilidad, es decir, se analiza el mayor de cada vector de tiempo, y cada elemento del mismo que sea igual o mayor al 95% de ese valor será 1, de lo contrario se convertirá en 0.
- c) Comparar cada uno de los vectores actuales contra cada vector de las matrices de sensibilidad horarias binarizadas obtenidas, es decir, para cada muestreo de la simulación, que corresponda con la ventana de tiempo utilizada, cuando el algoritmo encuentra un vector igual al que se ha calculado en alguna de las matrices de sensibilidad, indica que a ese instante de tiempo ocurre la fuga para la que se construyó dicha matriz, por el contrario, si no se encuentra ningún vector exactamente igual al actual, no se habrá detectado fuga en ese instante.
- d) Debido a que las fugas se analizan para un horizonte de 24 horas, es necesario sumar todas las firmas de fuga presentes (con firmas de fuga nos referimos al número de unos presentes en cada vector de la matriz que se conformó) durante las 24 horas, para encontrar el máximo de firmas presentes en un nodo, este máximo indicará entonces en cual nodo es que la fuga está presente.
- e) Una vez encontrado el nodo en el que la fuga está presente, se procede a calcular la magnitud de la misma, la manera más sencilla de realizar el cálculo, es identificando la columna de residuos actuales correspondiente al nodo con fuga, y dividir cada uno de ellos entre el valor de la matriz de sensibilidad correspondiente a la fuga detectada para a continuación obtener una media de los valores encontrados, esto entregará un valor aproximado a la magnitud de la fuga que se presenta en la actualidad. En la Fig. 12 se muestra el funcionamiento del presente algoritmo de una manera más comprensible.

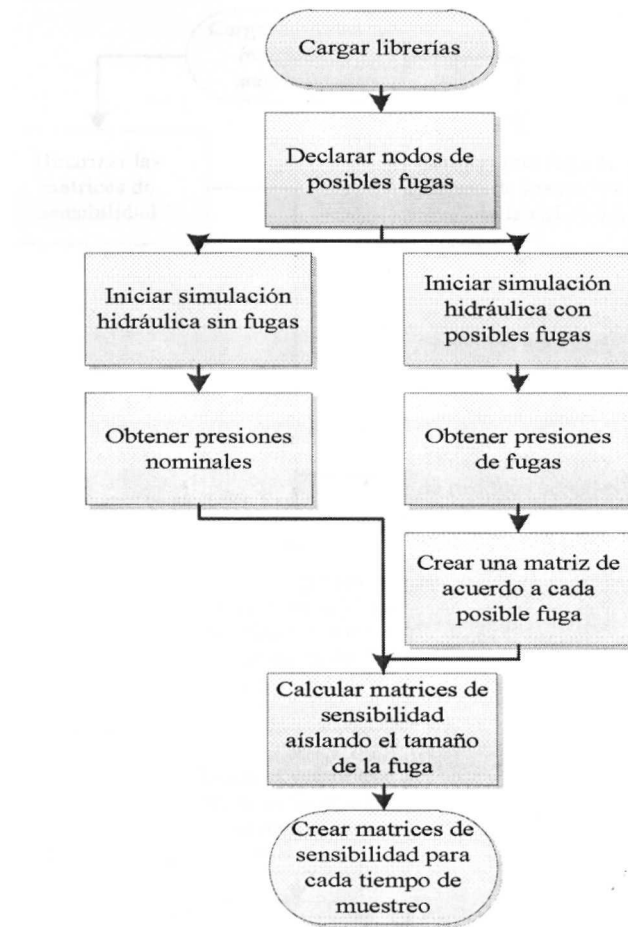


Fig. 11 Diagrama de creación de matrices de sensibilidad

La formulación matemática del procedimiento descrito es la siguiente:

$$S_{bin_{m,i,j}} = \begin{cases} 1 & \text{si } S_{m,i,j} > 0.95 * \max(S_{m.,j}) \\ 0 & \text{En otro caso} \end{cases} \quad (57)$$

$$\mathcal{R}_{bin_{i,j}} = \begin{cases} 1 & \text{si } \mathcal{R}_{i,j} > 0.95 * \max(\mathcal{R}_{.,j}) \\ 0 & \text{En otro caso} \end{cases} \quad (58)$$

Donde:

S_m son las m matrices de sensibilidad calculadas de acuerdo a los instantes de tiempo necesarios.

\mathcal{R} es la matriz de residuos actuales respecto a la que se desea encontrar fugas.

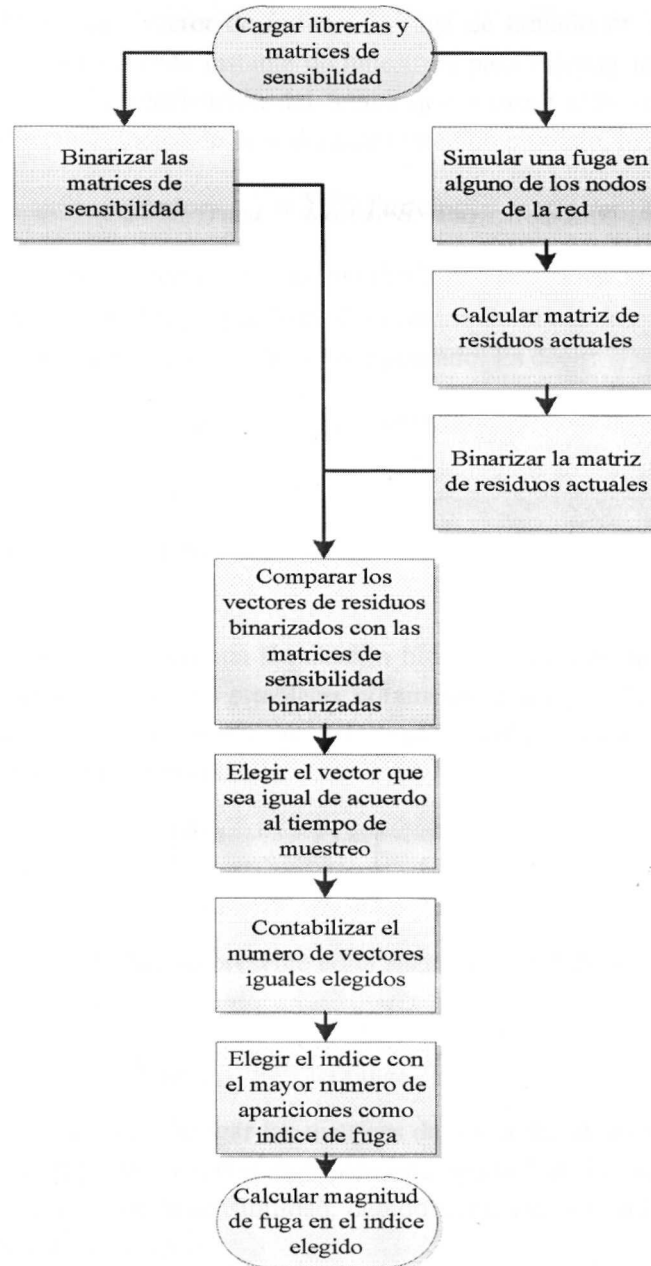


Fig. 12 Diagrama de funcionamiento del método de binarización

Comparación:

Si $\mathcal{R}_{bin.,j} = S_{binm.,j}$, entonces la fuga en el instante m está presente en el nodo con índice j , por lo cual se creará una matriz, en la cual, se guarden indicadores binarios de la existencia o ausencia de fuga, donde:

$$fuga_{binj,m} = \begin{cases} 1 & \text{si } \mathcal{R}_{bin.,j} = S_{binm.,j} \\ 0 & \text{si } \mathcal{R}_{bin.,j} \neq S_{binm.,j} \end{cases} \quad (59)$$

Con esto se obtiene un vector de índices de fuga de tamaño m , esto significa que se ha detectado un índice de fuga para cada instante de muestreo, para calcular la fuga en el horizonte de tiempo propuesto, se realiza la verificación del índice que aparece más veces a lo largo de dicho horizonte y se asigna este como índice de fuga durante el tiempo provisto, lo que se formula:

$$\mathit{vector}_{fuga} = \sum_{i=1}^m fuga_{binj_i} \quad (60)$$

Donde vector_{fuga} es un vector que contiene el número de firmas de falla para la fuga posible de acuerdo a la columna que este ocupa, por lo cual, encontrando el máximo de dicho vector, se tiene el índice del nodo que contiene la fuga en el horizonte pensado. Es decir:

$$\mathit{indice}_{fuga} = \max(\mathit{vector}_{fuga}) \quad (61)$$

5.1.2.2 Método de correlación de datos

El algoritmo inicia realizando una simulación hidráulica con el fin de obtener los residuos actuales. En esta simulación es necesario establecer el tamaño de la fuga, el nodo al que va a afectar y el tiempo en que estará presente la misma, para lo cual se utiliza la matriz de presiones actuales obtenida dentro de la simulación, denominada:

$$P_{fuga_{act}} = \begin{bmatrix} p_{1,1} & \cdots & p_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n,1} & \cdots & p_{n,m} \end{bmatrix} \quad (31 \times 97) \quad (62)$$

De acuerdo al comportamiento presente en el sistema los residuos actuales se calculan como se muestra:

$$\mathcal{R}_{fuga_{act}} = P - P_{fuga_{act}} \quad (63)$$

A continuación es necesario cargar las matrices de sensibilidad obtenidas anteriormente, que fueron guardadas en el archivo *res_muestra.mat*, para esta aplicación si es necesario aislar el tamaño de la fuga al momento de calcular la sensibilidad, debido a que esto servirá en un futuro para poder calcular la magnitud de la fuga presente.

Enseguida, es necesario obtener la correlación entre cada uno de los vectores de residuos actuales, con los vectores de cada una de las matrices de muestra, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\cos(\alpha) = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (64)$$

Donde:

$\cos(\alpha)$ = Coeficiente de correlación entre los vectores x, y

N = número de datos de cada vector

Para nuestro caso, el cálculo del coeficiente de correlación deberá calcularse como se indica a continuación:

Llamaremos $C = \cos(\alpha)$

Dado que se tiene una matriz de fugas actual, construida con m vectores de un tamaño n , es decir para cada nodo, se mide la diferencia de presión en cada hora del día respecto a la presión nominal, esto indica que es necesario obtener la correlación de cada vector mencionado, con cada uno de los vectores de la matriz de muestra correspondiente, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$C_m = \frac{\sum_{k=1}^n (\mathcal{R}_{fuga_{act}}(m)_k - \overline{\mathcal{R}_{fuga_{act}}(m)}) * (S(m,i)_k - \overline{S(m,i)})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\mathcal{R}_{fuga_{act}}(m)_k - \overline{\mathcal{R}_{fuga_{act}}(m)})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^n (S(m,i)_k - \overline{S(m,i)})^2}} \quad (65)$$

Donde:

$C_m =$ Vector de correlaciones para cada tiempo de muestreo

$m =$ número de muestra:

Para $\mathcal{R}_{fuga_{act}}$, m representa el número de columna de dicha matriz de acuerdo al tiempo de muestreo, mientras que para S representa el número de matriz en que están guardados los i vectores de cada posible fuga para ese tiempo de muestreo.

Una vez obtenidos cada uno de los vectores de correlación, se tiene una matriz de correlaciones de tamaño (31×97) , la cual contiene 97 vectores formados como se muestra en la formula de arriba, de acuerdo al tiempo de muestreo del que se habla. De esta matriz es necesario calcular la máxima correlación para cada columna, lo que indicará cuales de los datos de fuga actual están más correlacionados con los datos de posibles fugas que se tienen para cada tiempo de muestreo de la simulación, de acuerdo al resultado, el renglón de la matriz que tenga la correlación más alta, corresponde al índice del nodo en el que se está presentando la fuga, en el tiempo de muestreo indicado según la columna a la que se refiere.

$$nodo\ de\ fuga_m = \max(C_m) \quad (66)$$

Con el fin de obtener la fuga en el horizonte de tiempo a analizar, es necesario realizar una sumatoria de las correlaciones obtenidas en cada instante de muestreo, es decir una vez calculadas las correlaciones de cada vector de residuos actuales contra cada vector de las matrices de sensibilidad, se tiene una matriz de correlaciones, en la cual, cada elemento representa la correlación en un nodo a un instante de tiempo establecido, por lo cual se realiza lo siguiente:

$$C_{hte} = \sum_{i=1}^{97} C_m \quad (67)$$

Con esto se obtiene un vector de correlaciones para cada vector de posibles fugas, así la correlación más fuerte, indica el nodo en el que ocurre la fuga, seleccionando la sumatoria de mayor valor de acuerdo a lo calculado en el punto anterior.

$$indice_{fuga} = \max(C_{hte}) \quad (68)$$

Una vez obtenido el índice del nodo que contiene una fuga en el horizonte establecido, es posible obtener el ID del nodo al que se refiere, con lo cual la identificación de la fuga se hace posible. Para obtener la magnitud de la fuga, únicamente es necesario recordar que en un principio la matriz de sensibilidad se obtuvo aislando el tamaño de la fuga a la diferencia de presiones, por lo cual, sabiendo que $s = \frac{r}{f}$, siendo s la sensibilidad aplicada a la matriz, r el residuo correspondiente y f la magnitud de la fuga con la que se obtuvo la matriz de sensibilidad, podemos hacer:

$$m_f = \frac{\mathcal{R}_{fuga_{act}}}{s} \quad (69)$$

5.1.2.3 Método de distancia euclidiana

El siguiente método de detección de fugas consiste en realizar el cálculo de la distancia existente entre los vectores de residuos de presión actuales, y los vectores de las matrices de sensibilidad que han sido obtenidas para cada instante de tiempo, la fórmula utilizada para dicho cálculo se basa en la distancia euclidiana entre vectores, por lo cual para el análisis en cuestión se tiene lo siguiente:

$$\mathcal{D}_{e_{m_i}} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (\mathcal{R}_{fuga_{act}}(m)_k - S(m, i)_k)^2} \quad (70)$$

Donde:

$\mathcal{D}_{e_{m_i}}$ representa cada elemento del vector de distancias encontradas para un instante de tiempo dado, con lo que se entiende, que se tendrá al final una matriz con tantos elementos como vectores de residuos se tengan, así también tantas columnas como muestreos se hayan tenido en el sistema, por lo cual, es necesario realizar la sumatoria en el horizonte de tiempo establecido, de modo que el vector de distancias se calcula:

$$\mathcal{D}_{e_{hte}} = \sum_{i=1}^m \mathcal{D}_{e_{m_i}} \quad (71)$$

Donde el vector $\mathcal{D}_{e_{hte}}$ contiene en cada elemento el valor de la distancia euclidiana hacia cada una de las posibles fugas a ocurrir, por lo tanto se concluye que la fuga existente será aquella con la menor distancia euclidiana existente, es decir:

$$indice_{fuga} = \min(\mathcal{D}_{e_{hte}}) \quad (72)$$

De la misma manera que en el algoritmo de correlación, es posible calcular la magnitud aproximada de la fuga mediante la división entre la matriz de sensibilidad calculada para la fuga en cuestión, de modo que es posible aplicar la fórmula (69).

5.1.2.4 Método del ángulo entre vectores

Otro de los métodos a probar, es el denominado método del ángulo entre vectores, que como su nombre lo indica, consiste en calcular el ángulo existente entre cada vector de residuos actuales,

contra cada vector de las matrices de sensibilidad calculadas, con el fin de observar para cual de los vectores existe un ángulo menor, el cálculo se realiza de acuerdo a:

$$\alpha_{m_i} = \arccos\left(\frac{\mathcal{R}_{fuga_{act}}(m) \cdot S(m,t)}{|\mathcal{R}_{fuga_{act}}(m)| \cdot |S(m,t)|}\right) \quad (73)$$

Esto significa que se tendrán un total de m vectores de tamaño i , es decir, de acuerdo al número de posibles fugas e instantes de tiempo analizados en el horizonte de tiempo especificado. Debido a que el cálculo es de acuerdo a un horizonte de tiempo, es necesario sacar la media del ángulo durante todo ese tiempo, por lo que se aplica la siguiente fórmula:

$$\alpha_{hte} = \frac{\sum_{i=1}^m \alpha_{m_i}}{m} \quad (74)$$

Una vez obtenido el vector de ángulos correspondiente a todas las posibles fugas, es necesario determinar el ángulo más pequeño obtenida, lo que indicará la fuga presente durante el tiempo establecido, es decir:

$$indice_{fuga} = \min(\alpha_{hte}) \quad (75)$$

Para cada uno de los métodos no binarizados descritos hasta ahora (correlación, distancia euclidiana y ángulo), se construye la Fig. 13 en la que se describe paso a paso como actúa el algoritmo para llegar a la solución del índice que tiene una fuga durante el tiempo de simulación.

5.1.2.5 Método de aislamiento utilizando la optimización por mínimos cuadrados

De acuerdo a los análisis realizados con anterioridad, es sencillo observar que a partir de la inversa de la matriz de sensibilidad y utilizando los residuos correspondientes a las mediciones actuales, es posible obtener el nodo en el que se está presentando una fuga, de acuerdo con:

$$S * m_f = \mathcal{R} \quad (76)$$

Donde:

S = Matriz de sensibilidad.

m_f = Magnitud de la fuga.

\mathcal{R} = Residuo actual.

De lo cual se deduce que:

$$m_f = S^{-1} * \mathcal{R} \quad (77)$$

Sin embargo, si no se tienen todas las mediciones de los nodos que conforman la red, al momento de intentar invertir una matriz no cuadrada, se tendrá un error, esto podría solucionarse quizás utilizando la pseudoinversa de la matriz, pero se sabe por experiencia que los resultados no serán del todo satisfactorios, por lo cual se toma la decisión de utilizar un método mucho más factible,

es decir, buscar el mínimo error entre la diferencia de los residuos actuales contra el producto de la matriz de sensibilidad por la fuga considerada, esto da pie a un problema de optimización por mínimos cuadrados cuya función objetivo se define como sigue:

$$\min_j J_n = \sum_{i=1}^m (\mathcal{R} - S * m_f)^2 \quad (78)$$

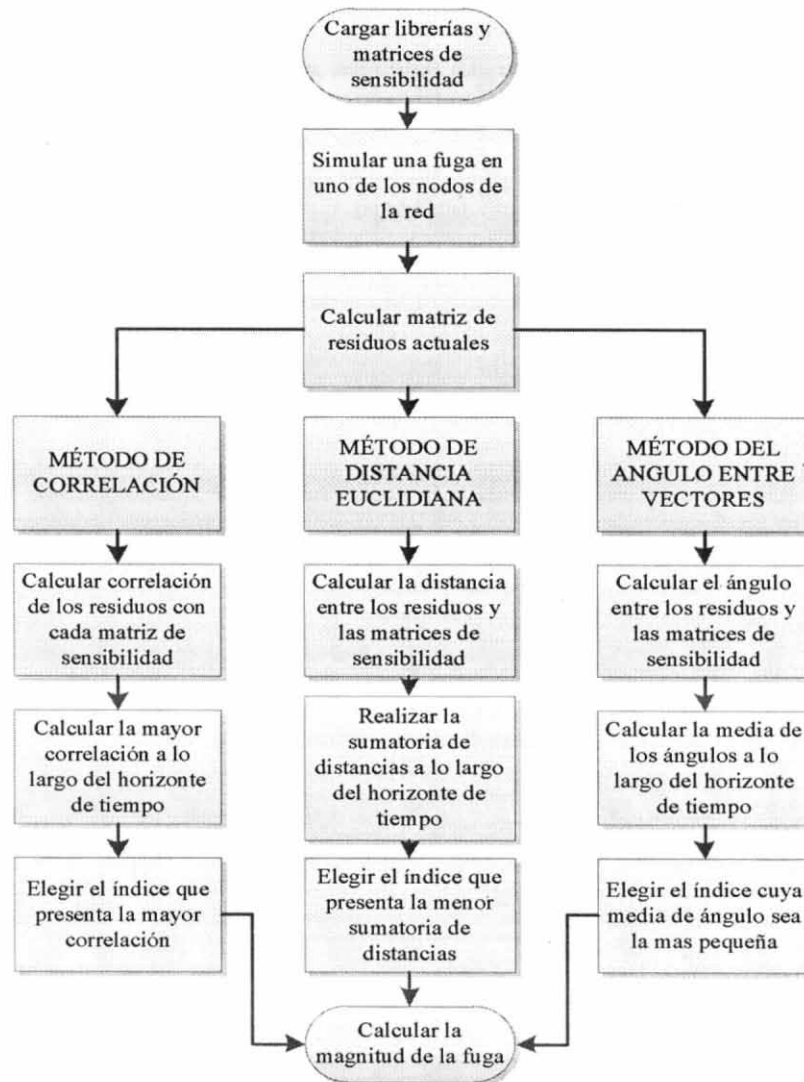


Fig. 13 Diagrama de funcionamiento de métodos de correlación, ángulo y distancia euclidiana.

Donde:

J_n Es un vector de tamaño n en el cual cada índice J indica la sumatoria en el horizonte de tiempo establecido del error cuadrático que se obtiene al utilizar cada una de las matrices de sensibilidad con que se cuenta en el análisis de posibles fugas. Una vez calculado el menor de los índices, es posible saber el nodo en que se está presentando la fuga, y al mismo tiempo la magnitud aproximada de la

misma, ya que el método requiere obtener un tamaño de fuga que minimice el error cuadrático para cada caso. Este procedimiento se detalla en la Fig. 14.

Para la aplicación del algoritmo por mínimos cuadrados, se utiliza el toolkit de Matlab de optimización que consiste en la minimización con restricciones de funciones no lineales, los datos a entregar a la herramienta mencionada son:

- **Restricciones:** Para la aplicación presente solamente es necesario declarar como restricciones el hecho de que los valores a entregar sean mayores a 0, ya que es imposible que haya un flujo de fuga de valores negativos, así como dar un límite de tamaño de fuga presente en el sistema. Para el proyecto base que se está trabajando, se propone un límite de fuga de 200 *lps*.

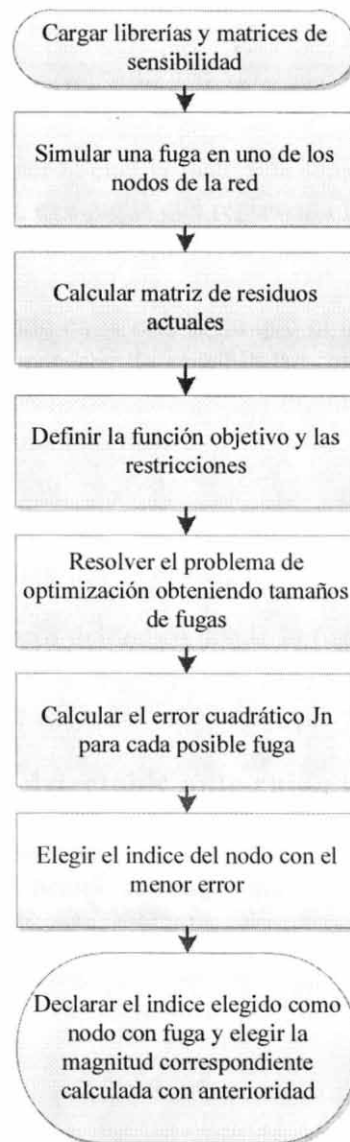


Fig. 14 Diagrama de funcionamiento del método de optimización por mínimos cuadrados

- **Función de costo:** Se debe formar una función de costo como se describió en la formula (78), formando cada elemento de la misma de acuerdo con:

$$m_f = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |(\mathcal{R}_{fuga_{act}} - S_{fugas_n})^2| \quad (79)$$

Donde:

m_f = Aislamiento de la fuga presente en la red.

$\mathcal{R}_{fuga_{act}}$ = Residuos presentes al momento de la detección.

S_{fugas_n} = Matrices de sensibilidad de acuerdo a la posible fuga presente (desde el primero hasta el último nodo que pueda presentar una fuga).

Una vez obtenidos cada uno de los índices J , es necesario hacer una comparación entre cada uno de ellos para elegir el menor de los índices presentados, esto significa que se está tomando en cuenta una fuga presente en la red, por lo cual la matriz de sensibilidad que multiplicada por la fuga considerada devuelva el menor error, es aquella que representa la fuga actual en la red. Sabiendo que se obtiene al mismo tiempo el valor de la magnitud de la fuga, es posible discernir entre fugas reales o falsos positivos que se presenten, esto mediante dicho valor, es decir si el valor es muy pequeño significa que no hay una fuga presente en la red, si no que el menor error encontrado forzosamente tiene que apuntar hacia una de las matrices de sensibilidad, otra de las maneras de desechar fugas inexistentes es observando el valor del error que resulta mínimo, si es demasiado grande, significa que la red está comportándose de manera normal.

De aquí definimos entonces:

$$indice_{fuga} = \min(J_n) \quad (80)$$

Con esto obtenemos el número del índice donde la fuga se está presentando, y la magnitud queda ahora implícita en el cálculo de la optimización, ya que el algoritmo aloja dicho valor en una variable, que para el proyecto ha sido definida como tam_{fuga} .

5.1.3 Análisis de fuga mínima detectable ante ruido en la red

De acuerdo a los análisis realizados hasta el momento, se sabe que una vez teniendo la matriz de sensibilidad, para cada instante de tiempo se cumple que:

$$\mathcal{R} = y - \hat{y} = S m_f \quad (81)$$

Donde:

$$\hat{y} = S d \quad (82)$$

y Son las presiones nominales del modelo

\hat{y} Representa las mediciones actuales

S Es la matriz de sensibilidad

m_f Es la fuga actual

d Es la demanda para el actual instante de tiempo

Por lo tanto:

$$y - Sd = Sm_f \quad (83)$$

Donde puede verse que en ausencia de ruido podría detectarse cualquier fuga, ya que la mínima fuga se vuelve cero, es decir, cuando Sd es igual a y , $m_f = 0$.

ANALISIS DE RUIDO EN LA DEMANDA

Si se considera presencia de ruido en la demanda, se tendrá que:

$$y - S(d \pm \Delta d) = Sm_f \quad (84)$$

De donde se puede deducir que:

$$m_f = |\Delta d| \quad (85)$$

Donde:

Δd Representa el ruido que existe en la demanda al momento de la detección.

Esto significa que la mínima fuga detectable ante presencia de ruido en la demanda será igual a la magnitud del ruido existente en dicha demanda para el instante de muestreo considerado.

ANALISIS DE RUIDO EN LA MEDICIÓN

Si ahora para las mismas condiciones se considera que existe ruido en la medición, se tiene que:

$$y \pm \Delta y - Sd = Sm_f \quad (86)$$

Por lo tanto:

$$m_f = S^{-1}|\Delta y| \quad (87)$$

Donde:

Δy Es el ruido presente en las mediciones.

Esto indica que ante ruido en la medición, la mínima fuga que puede ser detectada, se obtiene de acuerdo al ruido aplicado a la medición multiplicada por la inversa de la matriz de sensibilidad obtenida para ese instante de tiempo, lo que significa que los métodos de detección serán más sensibles al ruido en la medición.

ANALISIS DE COMBINACIÓN DE RUIDO

En caso de que se presente ruido tanto en la medición como en la demanda, se tendrá que:

$$y \pm \Delta y - S(d \pm \Delta d) = Sm_f \quad (88)$$

De donde se deduce que:

$$m_f = S^{-1}|\Delta y| + |\Delta d| \quad (89)$$

De cuya ecuación podemos concluir que la mínima fuga detectable en presencia de ruido tanto en la demanda como en la medición, dependerá no sólo de dicha cantidad de ruido, sino también del efecto de la matriz de sensibilidad en el cálculo.

5.2 Aplicación de los métodos en las redes experimentales

Para comprobar el funcionamiento de los métodos, se propone trabajar con una red principal a partir de la cual se construyen los algoritmos, esta red está descrita en [3] y por otra parte, comprobar el funcionamiento aplicando fugas en otras 2 redes de prueba, la primera de ellas proporcionada por la UPC como medio de prueba, y la segunda basada en una red con caudales probados que aparece en el portal de EPANET.

5.2.1 Aplicación en la primera red - Hanoi

La red como puede verse en [3] consta de 31 nodos de demanda, 34 tuberías de caudal y un embalse de abastecimiento de acuerdo a la Fig. 15. Para esta red se tiene un horizonte de tiempo de 24 horas, durante el cual se realizará la detección de fugas, cuyos valores se muestran en la Tabla 3

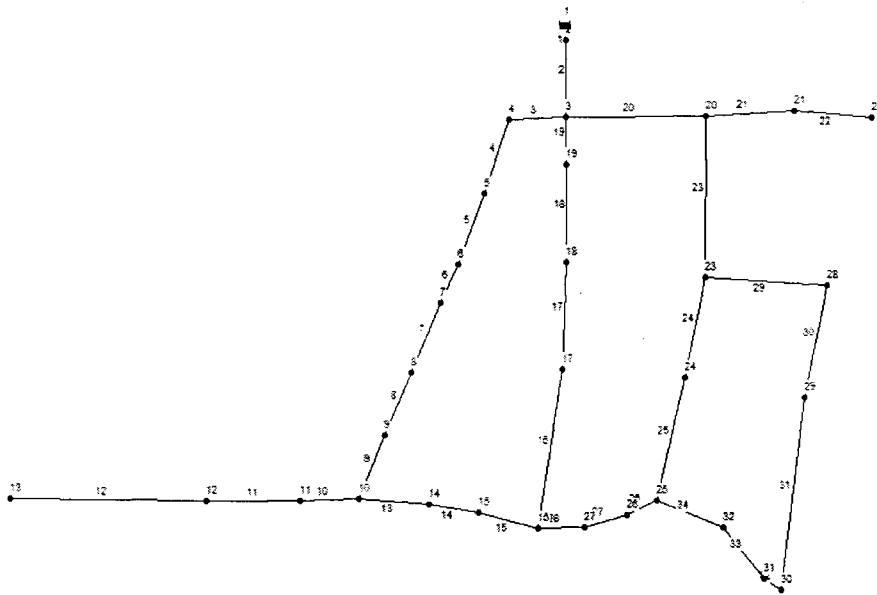


Fig. 15 Configuración de la primera red de aplicación

De acuerdo a las bases existentes, se diseña un patrón de demanda típico para la red, que consiste en lo que se muestra en la Fig. 16, este patrón sigue un comportamiento basado en el factor establecido a cada instante de medición, como puede verse, para que la optimización realizada en [3] se cumpla para cada instante, el factor mayor será siempre menor a 1, con esto se garantiza que la

máxima presión nunca supere a la establecida, y de este modo siempre se pueda satisfacer la demanda de los nodos tal como se planeo.

El modelo se diseña con un tamaño de simulación de 24 horas, con resultados para cada 15 minutos de muestreo, esto en principio significa que se tienen un total de 97 muestras por cada simulación, ya que el software inicia cada simulación a las 0:00 horas. ($24 \text{ horas} * 4 \text{muestras/hora} = 96 + 1 \text{ muestra de la hora inicial}$), EPANET trabaja las simulaciones hidráulicas en segundos, por lo cual se debe tener especial cuidado a la hora de trasladar a Matlab, puesto que los códigos de comunicación entenderán cada paso de tiempo como un segundo.

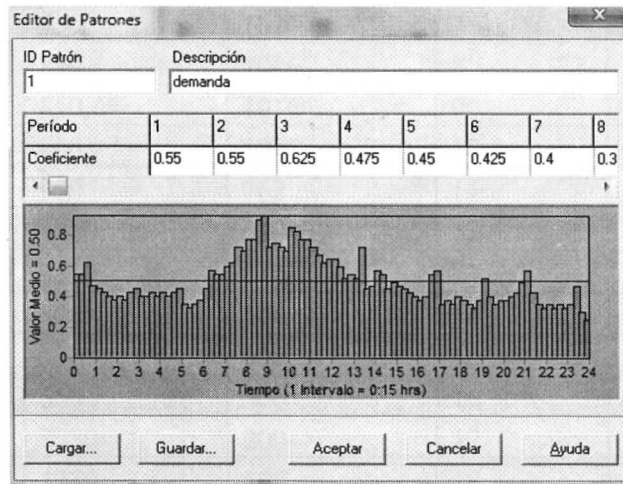


Fig. 16 Patrón de demanda para Hanoi

Mientras que para la modelación de las fugas, se necesita un patrón basado en que la fuga se mantendrá constante durante el horizonte de tiempo establecido para la red, de modo que el patrón de fugas será el de la Fig. 17.

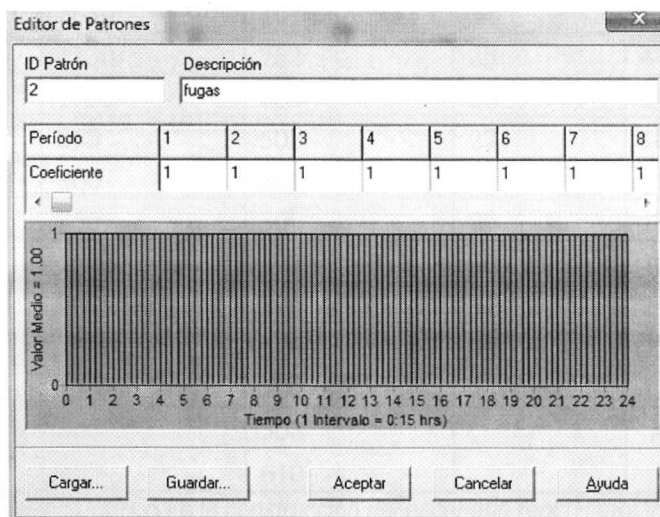


Fig. 17 Patrón de fugas para Hanoi.

Parámetros de la red de Hanoi Vietnam				
TUBERÍA	LONGITUD	DIAMETRO	NODO	DEMANDA
1	100	1016	2	247.22
2	1350	1016	3	236.11
3	900	1016	4	36.11
4	1150	1016	5	201.39
5	1450	1016	6	279.17
6	450	1016	7	375
7	850	1016	8	152.78
8	850	1016	9	45.83
9	800	1016	10	145.83
10	950	762	11	138.89
11	1200	610	12	155.56
12	3500	610	13	261.11
13	800	508	14	170.83
14	500	300	15	77.78
15	550	300	16	86.11
16	2730	300	17	240.28
17	1750	508	18	373.61
18	800	508	19	16.17
19	400	610	20	354.17
20	2200	1016	21	258.33
21	1500	508	22	134.72
22	500	300	23	290.28
23	2650	1016	24	227.78
24	1230	762	25	47.22
25	1300	762	26	250
26	850	508	27	102.78
27	300	300	28	80.56
28	750	300	29	100
29	1500	407	30	100
30	2000	300	31	29.17
31	1600	300	32	223.61
32	150	300	1 (embalse)	130m de
33	860	508		Altura
34	950	610		

Tabla 3 Datos para la construcción del escenario real (Hanoi Vietnam 1990)

Detección de fugas en la red de Hanoi

Para iniciar con el proceso de detección, al principio es necesario calcular las matrices de sensibilidad dado que es posible que se presente una fuga en cualquiera de los nodos que conforman la red. Por lo cual, se aplica el primer algoritmo a la red de distribución Hanoi, sabiendo que se cuenta con un total de 32 nodos, se indican los ID's de cada uno de ellos, desde el 2 hasta el 32, que es la manera como están identificados en EPANET. De acuerdo al algoritmo, se obtienen los índices que corresponden a cada uno de ellos, y con esto, es posible aplicar una fuga a la vez en cada uno de ellos (para este caso se aplica una fuga de 50 litros por segundo de magnitud), de modo que, para cada posible fuga se tiene una matriz de fugas en un horizonte de tiempo de 24 horas, con muestreos cada 15 minutos, la manera de indicarle al algoritmo el tamaño de las muestras, es indicando el divisor que debe tener cada siguiente paso, es decir, en el algoritmo se indica a EPANET que realizará una simulación mientras el siguiente tiempo sea diferente de cero, puesto que como se había mencionado, los periodos de muestreo serán de 15 minutos, el divisor debe ser de 900 segundos; otra manera de representar las matrices de sensibilidad, es tener una por cada instante de muestreo, en la que se contemplen todas las posibles fugas que puedan ocurrir en ese instante, ambas maneras, se calculan en el primer algoritmo. Con el fin de observar lo que se calcula en dichos puntos, se muestran las gráficas que se obtienen una vez calculadas dichas matrices. Si se toma un instante de muestreo durante el día, para efectos ilustrativos, se elige el instante en el que la demanda es mayor, en el cual, la matriz de sensibilidad queda como se muestra en la Fig. 18.

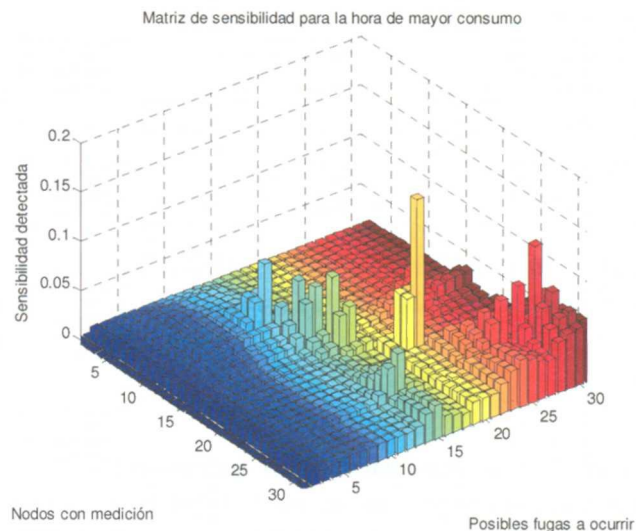


Fig. 18 Matriz de sensibilidad para el instante de mayor consumo

De la misma manera es posible tener una matriz de sensibilidad para una fuga, como se mencionó de una magnitud de 50 *lps*, durante el horizonte deseado, podemos suponer una fuga en el índice 15, la matriz de sensibilidad a las 24 horas se muestra en la Fig. 19.

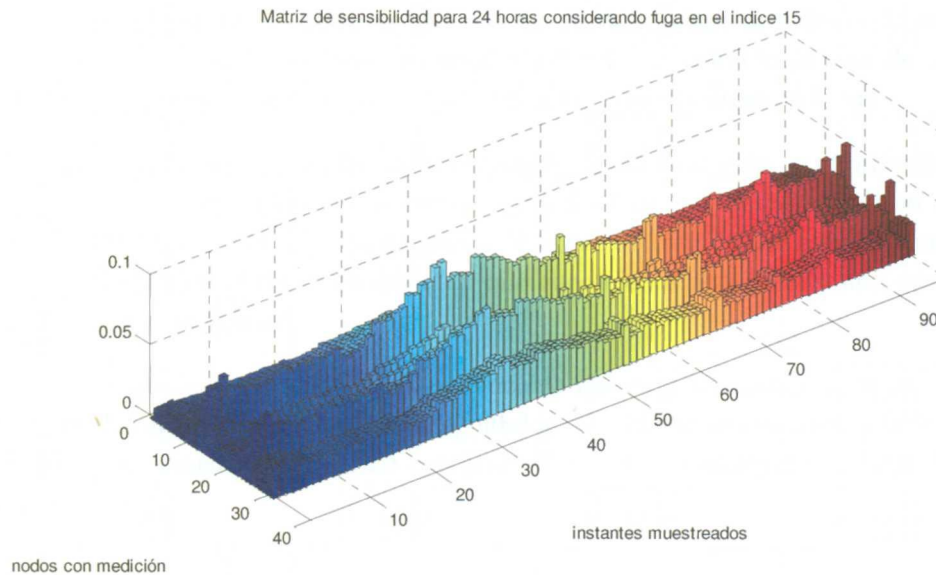


Fig. 19 Matriz de sensibilidad considerando una fuga en el índice 15 en un horizonte de 24 horas

De la misma manera que se muestra en la Fig. 18 y Fig. 19, se tendrán el resto de matrices dependiendo de cada nodo e instante de tiempo que se desea analizar. Cada una de las matrices mostradas servirá para realizar el cálculo debido, dependiendo del método a utilizar, es importante recordar que para este análisis, se considera que se tienen mediciones en todos los nodos involucrados. Las matrices calculadas, dependiendo de la utilización, se guardan en una estructura, se asigna el nombre de archivo *res_fugas.mat* para almacenar cada una de las matrices de sensibilidad por tipo de fuga, mientras que el archivo *res_muestra.mat* contiene la matriz de sensibilidad que corresponde a cada instante de muestreo de la simulación.

Una vez obtenidas todas las matrices de sensibilidad que se necesitan, se procederá a iniciar con la detección, lo cual se lleva a cabo utilizando el segundo algoritmo diseñado, el cual se encuentra dividido principalmente en 2 etapas:

ETAPA 1: Medición

En esta etapa, el algoritmo realiza dos simulaciones, la primera de ellas con la red en funcionamiento normal, esto con el fin de tener en un mismo programa tanto el comportamiento normal como el escenario de fugas. Se guardan las mediciones de presión, demanda y caudal en las matrices *P*, *D* y *F* respectivamente, por medio de ellas se podrá realizar la comparación de estado de la red. La segunda simulación consiste en obtener el comportamiento que llamaremos actual de la red, este comportamiento consiste en simular una fuga en alguno de los nodos posibles, indicando una demanda extra en litros por segundo en dicho nodo, luego se calculan los residuos actuales, por medio de los cuales se detectará si existe una fuga presente en el sistema, dichos residuos se almacenan en una matriz $m \times r$, donde m es el número de nodos, para este proyecto equivalente a 31 y r son las muestras existentes, para nuestro caso 97, la matriz recibe el nombre de *RES_FUGA_ACT*.

ETAPA 2: Detección, aislamiento e identificación de fuga con cada uno de los métodos

Hasta este momento se cuenta ya con una matriz de residuos actuales en la que se comparan las presiones en fuga con las de funcionamiento normal, así como cada una de las matrices de sensibilidad en cada instante de muestreo de acuerdo a las posibles fugas en la red.

En esta etapa se introducen los datos obtenidos de la simulación en el procedimiento de cada uno de los métodos, para realizar el aislamiento. Al final de esta etapa, cada uno de los cálculos entrega como resultado un índice y una magnitud de fuga existente, lo que servirá para comparar cada uno de ellos entre sí, con el fin de observar en qué condiciones actúa mejor uno que otro y cuál de ellos es más eficiente en general.

El desarrollo de cada uno de los métodos se ilustra a continuación en un escenario ideal, suponiendo que la fuga sea constante y de magnitud igual a la que se utilizó para obtener las matrices de sensibilidad, se presenta el siguiente escenario con la simulación de una fuga de 50 litros por segundo en el nodo 5.

Aplicación de métodos

En principio, para saber si existe o no una fuga, es necesario observar los residuos de las mediciones, con el fin de saber si la diferencia en Presión es significativa o no. En la Fig. 20 se muestran los residuos correspondientes al nodo 5 durante el horizonte de tiempo establecido, puede verse que hay una diferencia de presión considerable durante el transcurso de las 24 horas con respecto a la presión nominal que se debería tener en la red en ese mismo tiempo de simulación cuando hay un comportamiento normal, lo que indica que realmente se está presentando una fuga, sin embargo con esta información aún es imposible saber en qué nodo precisamente la fuga está presente, ya que las diferencias de presión se presentan en todos los nodos, es decir, una fuga en algún nodo, tiene efecto en las presiones de todos los demás nodos de la red.

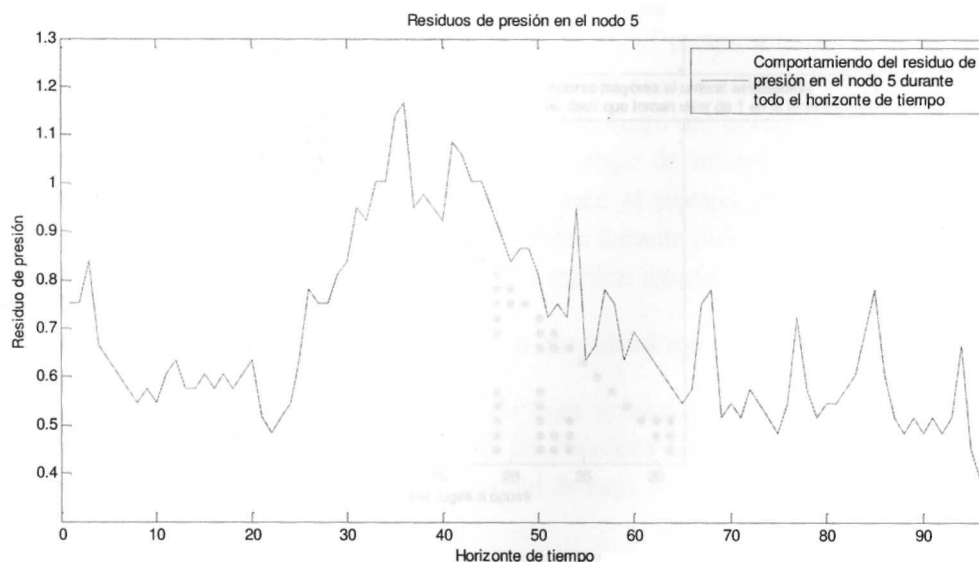


Fig. 20 Residuos en el nodo 5 a lo largo de 24 horas

Otra manera de saber si una fuga se está presentando, es analizar los mismos residuos para cada instante de tiempo, por ejemplo, la Fig. 21 muestra los residuos existentes a la hora de mayor consumo a lo largo de toda la red, contrariamente con lo que pasa en la figura anterior, para este caso se analizan todos los nodos en determinado momento del horizonte.

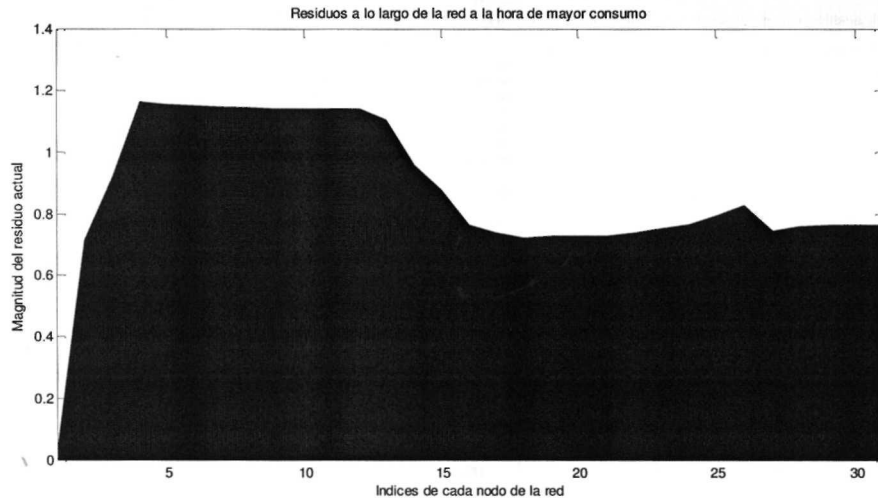


Fig. 21 Residuos actuales a lo largo de toda la red para el instante de mayor consumo

1: MATRIZ BINARIZADA

Para poder aplicar el método de la matriz binarizada, es indispensable binarizar primero las matrices de sensibilidad, para el instante de mayor consumo, la matriz binarizada será como se muestra en la Fig. 22.

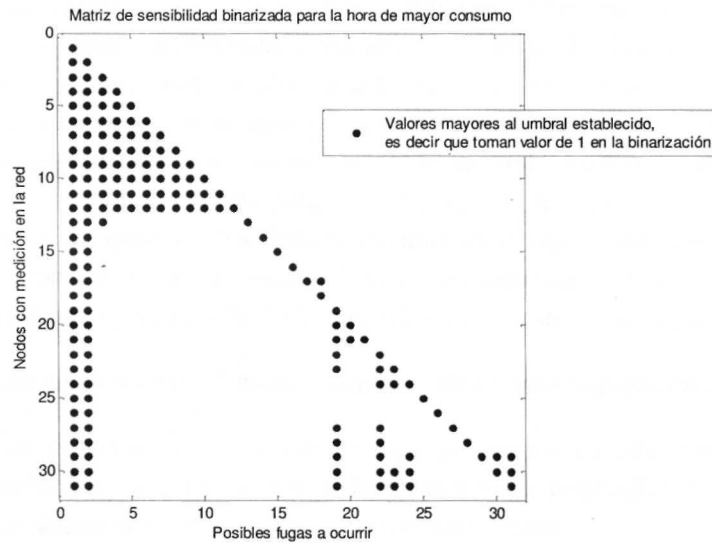


Fig. 22 Matriz de sensibilidad binarizada para el instante de mayor consumo

De la misma manera es necesario realizar una binarización de los residuos actuales, quedando ésta para el mismo instante de muestreo que se mostró en la matriz de sensibilidad, según se ve en la Fig. 23.

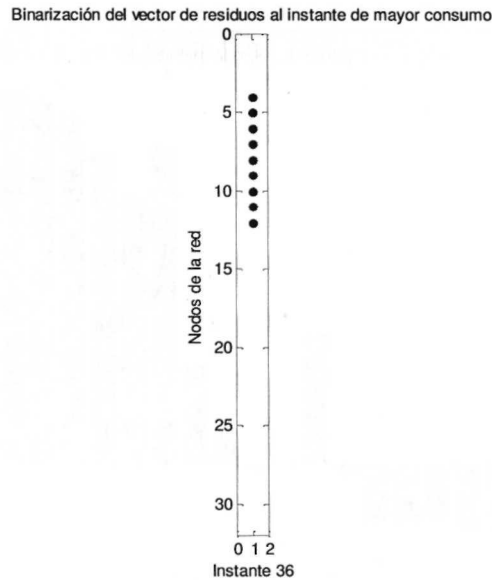


Fig. 23 Vector de residuos actuales binarizado para el instante de mayor consumo.

Lo que el método realiza a continuación es una comparación entre el vector de residuos contra cada uno de los vectores posibles en la matriz de sensibilidad para ese instante de tiempo, y detiene la comparación en el momento que encuentra un vector binario exactamente igual al vector actual. Como puede verse, para este caso en particular, la columna 4 de la matriz de sensibilidad contiene un vector exactamente igual al vector en cuestión, esto indica que la fuga está presente en el nodo que tiene el índice 4, una vez obtenido dicho índice, el comando de comunicación proporciona el nodo correspondiente al índice encontrado, en este caso, el índice 4 corresponde al nodo 5, que como se dijo en principio es aquel al que se aplicó la simulación de fuga. Luego, el mismo procedimiento se sigue para cada uno de los vectores a lo largo del horizonte de tiempo establecido, por tanto, se encuentra un índice de fuga para cada tiempo de muestreo, el programa realiza una sumatoria de las veces que aparecen los índices durante el tiempo mencionado, y entrega como resultado el índice que aparece el mayor número de veces durante todo el tiempo de la simulación. Al final de la prueba, el resultado para el método de binarización muestra lo siguiente:

Fuga en el índice 4 que corresponde al nodo 5 con magnitud aproximada de 50 lps.

Como se puede observar, debido a que la fuga presentada en esta demostración tiene una magnitud igual a aquella con que se diseñaron las matrices de sensibilidad, el método no tiene problema en detectar exactamente el nodo y magnitud de fuga actual.

2: MÉTODO DE CORRELACIÓN

La aplicación de este método inicia con la comparación de cada vector de residuos de la red, con cada vector de la matriz de sensibilidad para el instante de tiempo correspondiente, la Fig. 24

muestra las correlaciones de cada uno de los vectores para el instante de mayor consumo, como puede verse, la correlación con la fuga en el índice número 4 es de 1, lo que claramente indica que en ese instante ocurre una fuga en el nodo 5 de acuerdo con la configuración de la red.

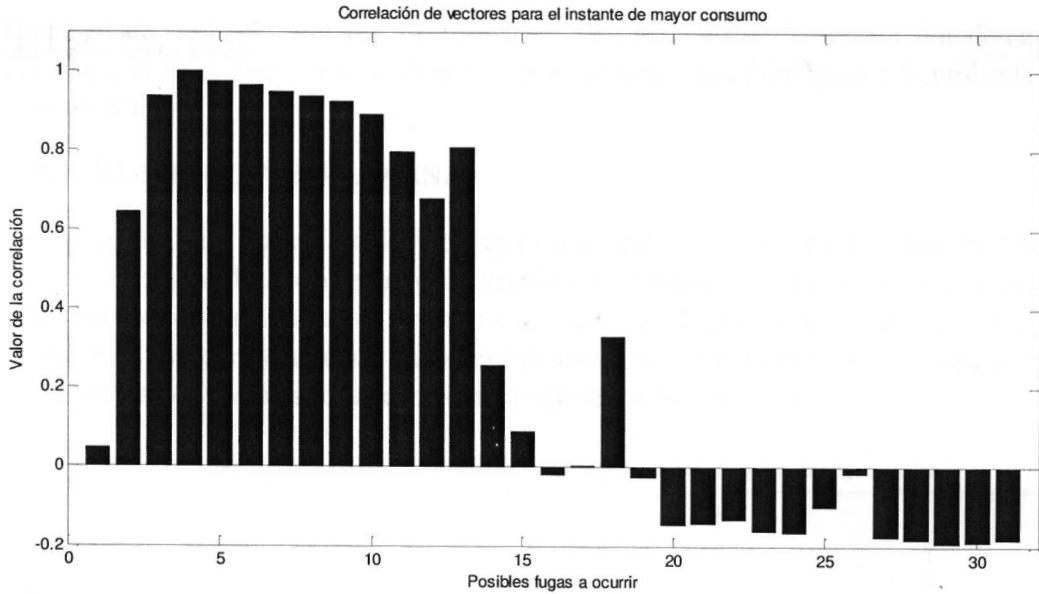


Fig. 24 Correlación de vectores en el instante de mayor consumo

Debido a que la detección se pretende realizar para el horizonte de 24 horas, se realiza la sumatoria de correlaciones a cada instante, quedando el resultado tal como se muestra en la Fig. 25, en la cual es posible observar que a lo largo del horizonte se cumple que el vector de fuga tiene una correlación mayor.

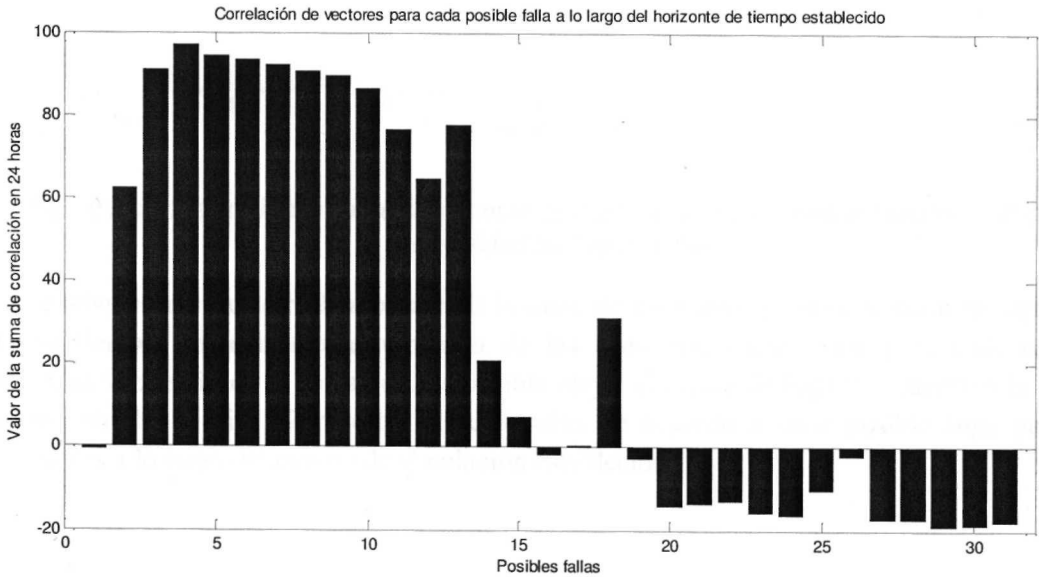


Fig. 25 Total de la sumatoria de correlaciones a lo largo del horizonte de tiempo

Una vez determinado el índice al que corresponde la fuga en el análisis actual, el método de correlación entrega la siguiente información:

Fuga en el índice 4 que corresponde al nodo 5 con magnitud aproximada de 50 lps.

Como puede verse, el resultado es satisfactorio, es decir, localiza la fuga en el nodo en el que está ocurriendo, y la magnitud es exacta debido a que se simula una fuga igual a la utilizada en las matrices de sensibilidad.

3: MÉTODO DE DISTANCIA EUCLIDIANA

Se realiza la misma aplicación de fuga, ahora utilizando el método de distancia euclidiana, el cual consiste en encontrar distancias entre cada uno de los vectores de residuos actuales, contra cada vector de las matrices de sensibilidad de acuerdo con el instante de muestreo al que se refiere, para el nodo en cuestión, la distancia euclidiana del vector de residuos a la hora de mayor consumo contra la matriz de sensibilidad de posibles fugas correspondiente, se muestra en la Fig. 26

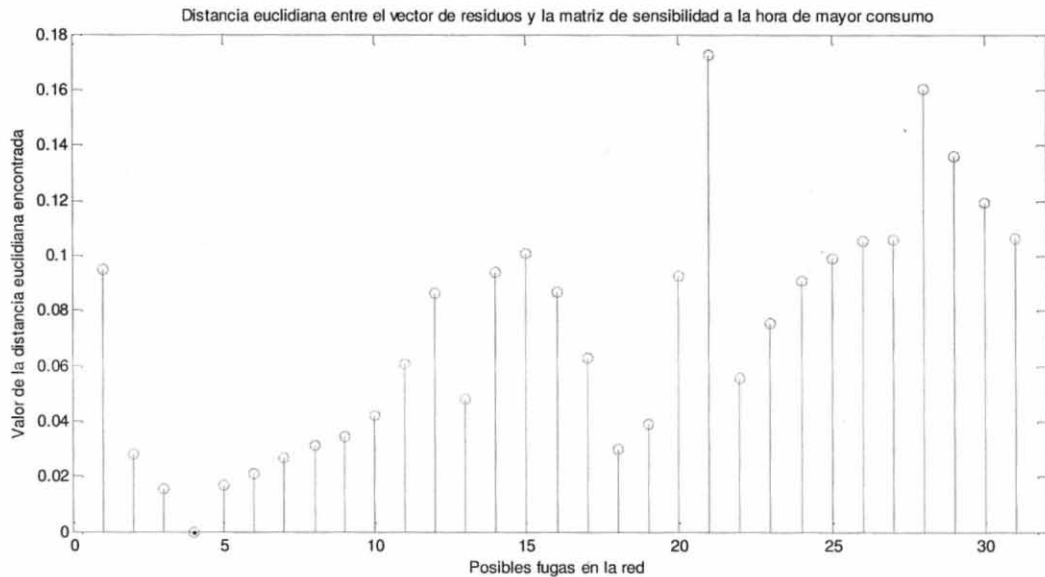


Fig. 26 Distancia euclidiana del vector de residuos a la hora de mayor consumo contra la matriz de sensibilidad correspondiente.

Este mismo proceso se realiza para cada instante de muestreo, y para encontrar la fuga en el horizonte de tiempo, se realiza una sumatoria de las distancias encontradas para cada muestra disponible. Una vez realizada la sumatoria, es posible elegir el índice de fuga de acuerdo a la menor distancia encontrada, la Fig. 27 muestra las distancias de acuerdo a cada posible fuga para los residuos actuales a lo largo del tiempo de simulación establecido.

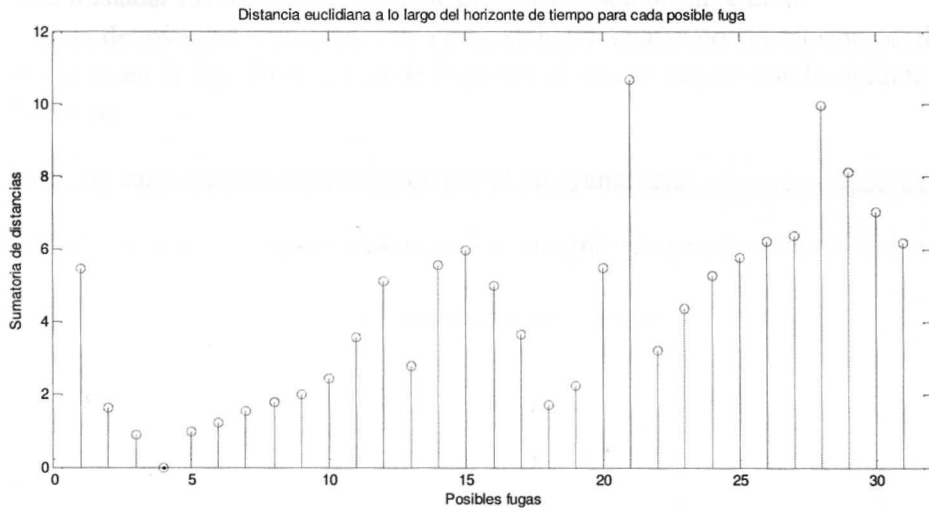


Fig. 27 Distancia euclidiana de los residuos a cada posible fuga durante 24 horas

Es claramente observable como para una fuga de 50 *lps.* (Es decir igual a aquella con que se diseñó la matriz de sensibilidad) la distancia se hace 0, por lo cual el índice del nodo con fuga es completamente aislable. El resultado para este método es:

Fuga en el índice 4 que corresponde al nodo 5 de magnitud aproximada de 50 *lps.*

4: MÉTODO DEL ÁNGULO ENTRE VECTORES

El análisis del menor ángulo existente, inicia con el cálculo del ángulo entre cada vector de residuos por instante de tiempo de acuerdo a la simulación actual contra cada vector de la matriz de sensibilidad calculada para el instante correspondiente, la Fig. 28 muestra los ángulos calculados respecto a cada posible fuga para el instante de mayor consumo de la simulación; en ella es posible observar que el ángulo más pequeño se da en el índice número 4, que corresponde al nodo 5 de la red.

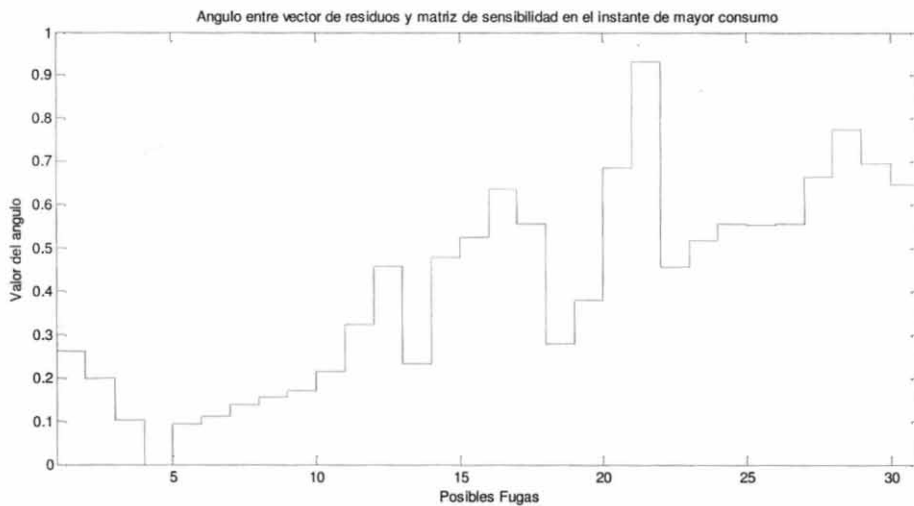


Fig. 28 Ángulo entre vector de residuos y matriz de sensibilidad a la hora de mayor consumo

Para trasladar los datos de fugas obtenidos para cada instante de tiempo, se obtiene la media de la sumatoria de los valores absolutos tal como se había explicado anteriormente, de este modo, se tiene como se ve en la Fig. 29 el índice de fuga con el menor ángulo medio durante el horizonte de tiempo planteado.

Para este caso el resultado entregado por el programa será:

Fuga en el índice 4 que corresponde al nodo 5 de magnitud aproximada de 50 lps.

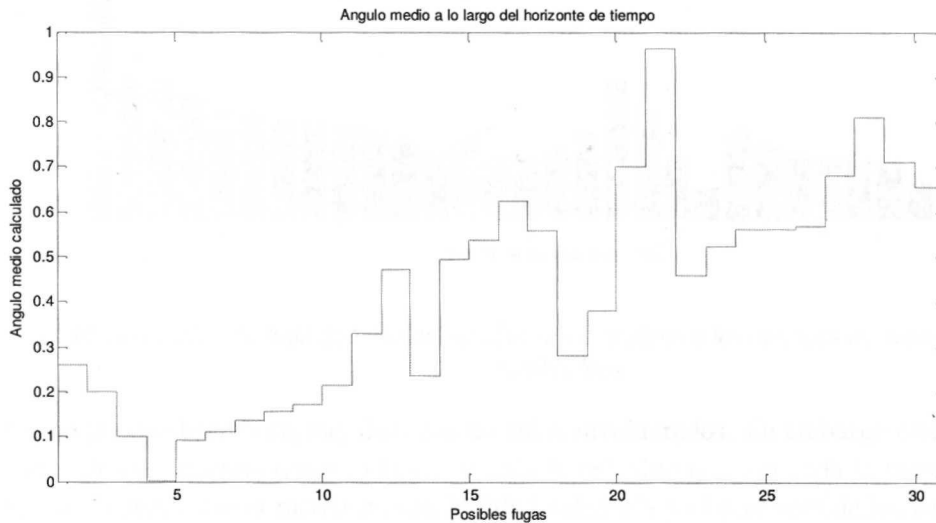


Fig. 29 Angulo medio a lo largo del horizonte de tiempo para cada posible fuga

5: MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN POR MÍNIMOS CUADRADOS

Este método tal como se había descrito, funciona de manera contraria a los anteriores, ya que parte del hecho de que se debe encontrar un valor de fuga que haga mínimo el error entre la matriz de sensibilidad que fue calculada, y la multiplicación de la matriz de residuos actuales por dicho valor de fuga, es por esto que este método calcula desde el principio el valor de la fuga a lo largo del horizonte de tiempo determinado para cada una de las posibles fugas que se presentan en la red, esto es visible en la Fig. 30, la cual muestra el valor que debería tener la fuga en cada uno de los índices de manera que el error sea lo menor posible.

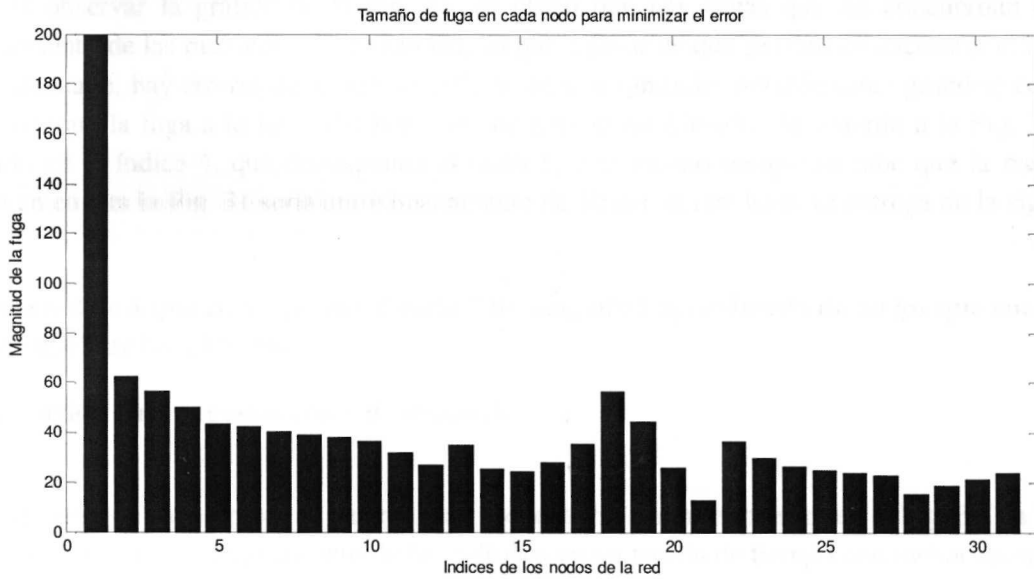


Fig. 30 Magnitudes de fuga que minimizan el error de acuerdo a las matrices de sensibilidad de cada posible fuga

Como puede observarse, hay distintos tamaños involucrados, sin embargo esto no indica que ocurran fugas de esas magnitudes a lo largo de toda la red, sino que esa sería la magnitud necesaria para que la diferencia entre la matriz de sensibilidad calculada y el producto de los residuos actuales por la fuga fuera el mínimo, por lo tanto, lo que realmente define la fuga existente, será aquella que tenga el menor error, en la Fig. 31 pueden observarse los errores para cada posible fuga. La fuga que realmente está ocurriendo es aquella con el mínimo error y magnitud correspondiente de acuerdo a las calculadas en la Fig. 30.

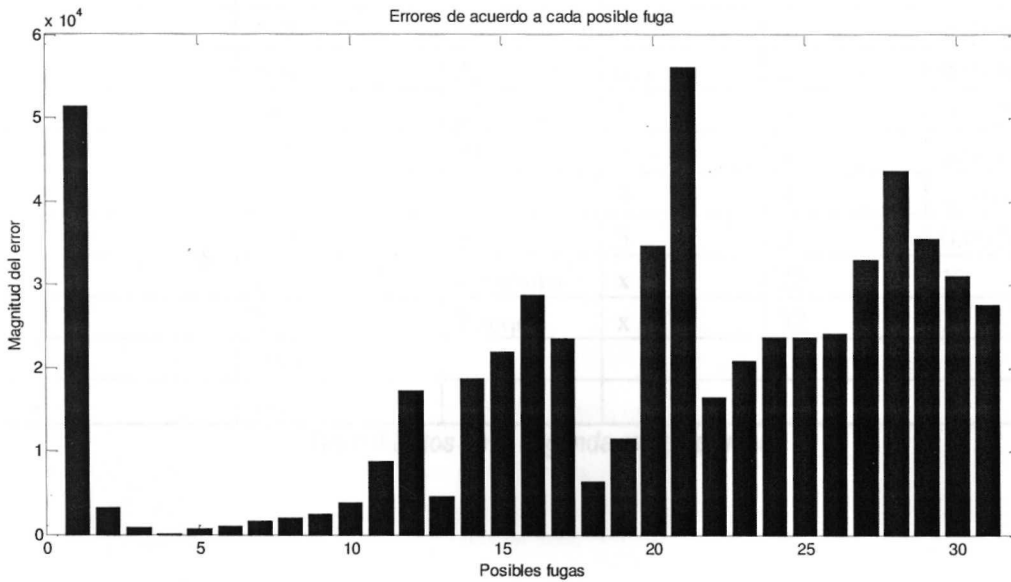


Fig. 31 Magnitudes de errores en la optimización

Al observar la gráfica de la Fig. 31, es obvio que hay fugas que no concuerdan con el comportamiento de las matrices de sensibilidad, ya que a pesar de que se trató de encontrar el tamaño de fuga adecuado, hay errores del orden de 10^4 , es decir magnitudes notablemente grandes; con esto se concluye que la fuga a lo largo del horizonte de tiempo establecido, de acuerdo a la Fig. 30 está ocurriendo en el índice 4, que corresponde al nodo 5, y al mismo tiempo se sabe que la magnitud tomando en cuenta la Fig. 31 sería aproximadamente de 50 *lps*, el resultado se entrega de la siguiente manera:

Fuga en el índice 4 que corresponde al nodo 5 de magnitud aproximada de 50 *lps* que considera constante durante las 24 horas.

5.2.2 Aplicación en la segunda red – Benchmark

La segunda red a probar es una red más pequeña, tal como se muestra en la Fig. 32, en la cual se pretende analizar el funcionamiento de los métodos en un patrón de tiempo con menor cantidad de muestras, así como una red en la que se utilizan caudales mucho menores que los vistos en la red anterior, además, esta red servirá también para verificar la eficiencia de cada uno de los métodos en una aplicación en la que están contemplados coeficientes de pérdidas en las tuberías. Los datos con los que se diseñó la red en cuestión se presentan en la Tabla 4.

Tubería	Longitud (Km)	Diámetro (mm)	Nodo	Demanda Base (<i>lps</i>)	Elevación	Coefficiente de pérdidas
10	2	400	10	0	5.8	0.00261129
11	2	300	11	5	5.8	0.01044514
12	2	350	12	5	4	0.01044514
21	2	200	13	3	2	0.01044514
22	2	200	21	5	4	0.01305643
31	2	200	22	6.5	2	0.01566771
111	4	200	23	5	0	0.01305643
112	4	250	31	3	4	0.00783386
113	4	300	32	3	5	0.01044514
121	4	200	33	3	0	0.00783386
122	4	200	Depósito	x	25	X
123	4	200	Tanque	x	32	X
21	2	200				
1	2	400				

Tabla 4 Datos de la segunda red de prueba

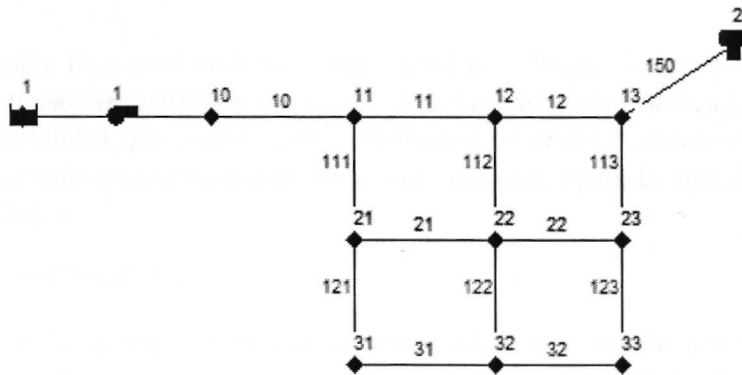


Fig. 32 Segunda red de prueba – Benchmark1

En este caso, el patrón de demandas se diseña con muestreos de 1 hora, realizando la simulación de las 0 a las 23 horas, lo que da un total de 24 muestras, el comportamiento de la demanda es el que se muestra en la Fig. 33, y de la misma manera que en la aplicación anterior, se necesita un patrón de fuga constante que se aplicará a la red en el momento que se utilice una simulación de fuga en cualquiera de los nodos.

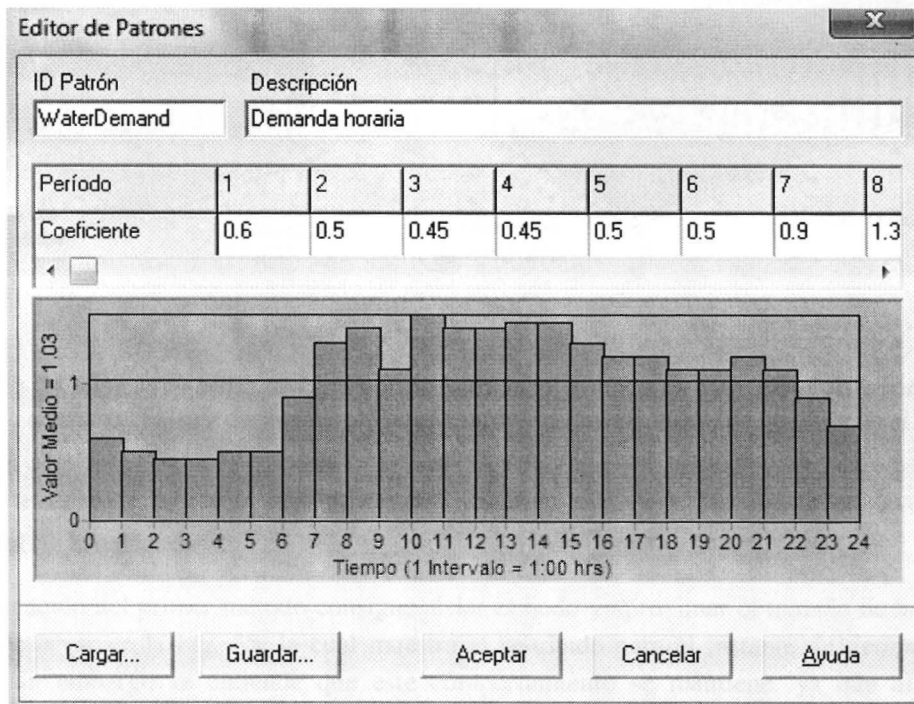


Fig. 33 Patrón de demanda para la red Benchmark

Se establecen los siguientes parámetros a la simulación de la red:

Declaración de los nodos que conforman la red: 10 nodos (9 con demanda y un nodo de conexión)

Divisor de tiempo = 3600 (para establecer muestras cada hora)

Demostración: fuga en el nodo 12 con magnitud de 0.19 *lps*. Es importante notar que para este caso la demostración se realiza con una magnitud de fuga diferente al utilizado para el cálculo de las matrices de sensibilidad, que como se verá a continuación, fueron calculadas con una magnitud de fuga de 0.2 *lps*. En este caso se muestran las gráficas necesarias para la hora de menor consumo durante la simulación.

MATRICES DE SENSIBILIDAD

Las matrices de sensibilidad correspondientes a esta red se calculan con un tamaño de fuga nominal de 0.2 *lps*. En la Fig. 34 se muestran las matrices de sensibilidad de las dos maneras posibles, tal como se describió en la primera red, se pueden obtener matrices de sensibilidad por instante de muestreo o para cada tipo de fuga.

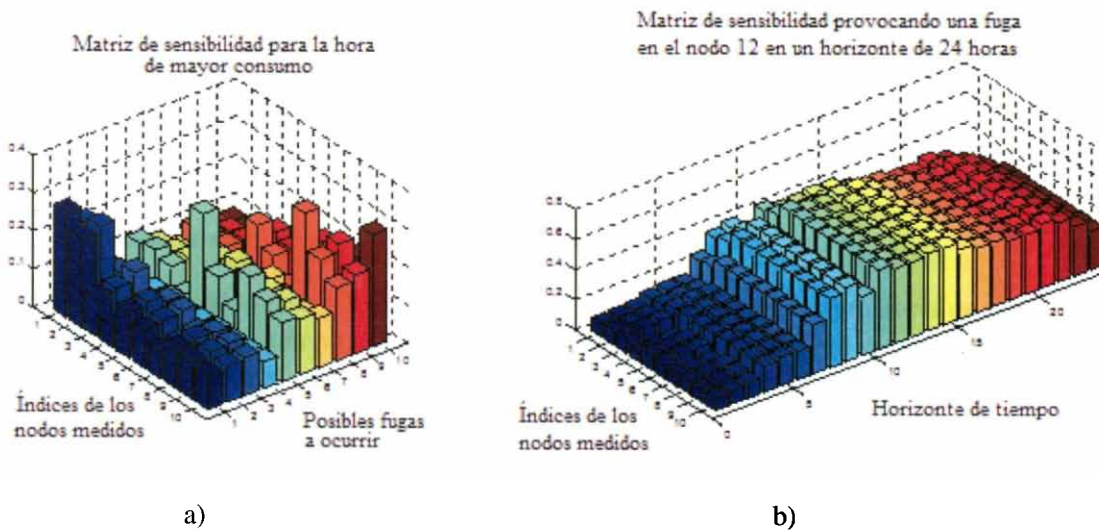


Fig. 34 Matrices de sensibilidad para la red Benchmark a) matriz de sensibilidad en la hora de menor consumo b) Matriz de sensibilidad en el horizonte de tiempo aplicando una fuga en el nodo 12

Aplicación de métodos simulando la fuga en el nodo 12 con una magnitud de 0.19 *lps*.

- **Matriz binarizada**

La aplicación del primer método consigue aislar el nodo y aproximar el tamaño de la fuga como se puede observar en la Fig. 35, la cual muestra el resultado para el instante de tiempo de menor consumo, sin embargo se entiende que este comportamiento se mantiene, ya que al realizar la sumatoria de firmas de fuga a lo largo del horizonte de tiempo, la conclusión es que la fuga se encuentra en el índice 3 correspondiente al nodo 12.

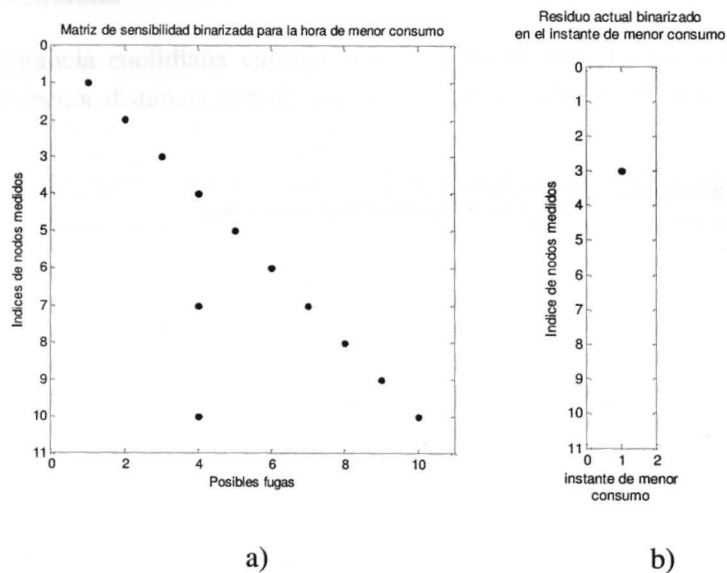


Fig. 35 Comparación del vector de residuo actual binarizado y la matriz de sensibilidad en la hora de menor consumo.

- **Correlación de datos**

En la Fig. 36 puede verse el resultado obtenido una vez realizada la sumatoria de correlaciones a lo largo del horizonte de tiempo. La efectividad de este método ante la red se comprueba puesto que como se ve en la gráfica, el índice de fuga con mayor correlación a lo largo del tiempo indicado es el número 3, que corresponde al nodo 12 de acuerdo a lo descrito anteriormente.

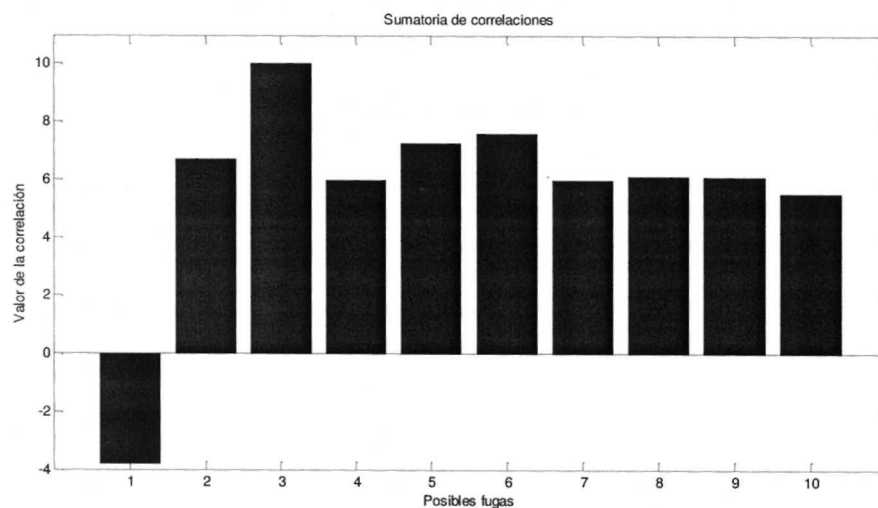


Fig. 36 Sumatoria de correlaciones para fuga aplicada en Benchmark

- **Distancia Euclidiana**

El método de distancia euclidiana entrega la gráfica de la Fig. 37, en la cual se observa que coincide el índice de menor distancia con el número 3, correspondiente al nodo 12 que fue al que se aplicó la fuga.

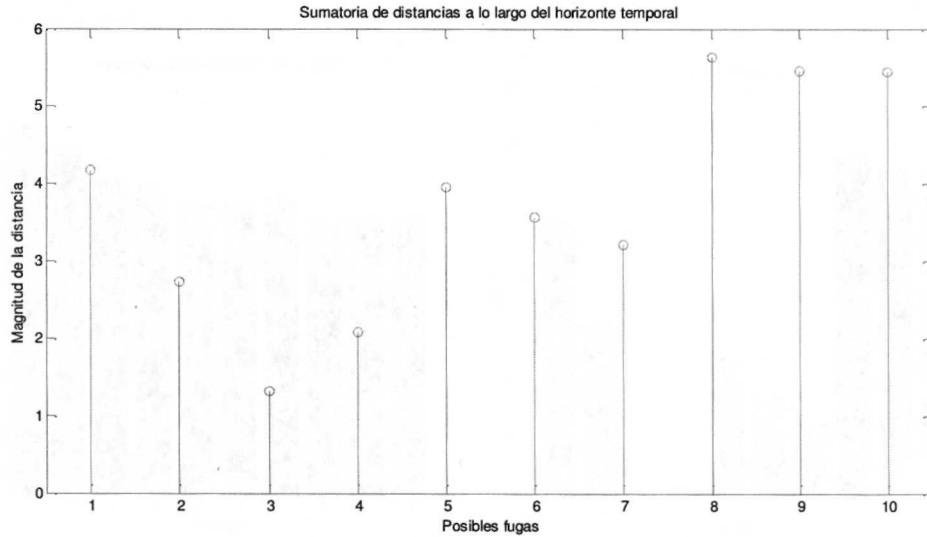


Fig. 37 Sumatoria de distancias a lo largo del horizonte de tiempo especificado

- **Ángulo entre vectores**

El método del ángulo proporciona al final del cálculo una gráfica como la que se muestra en la Fig. 38, donde es fácilmente observable que el ángulo medio en el índice 3 es casi nulo, lo que significa que es el nodo 12 el que tiene una fuga.

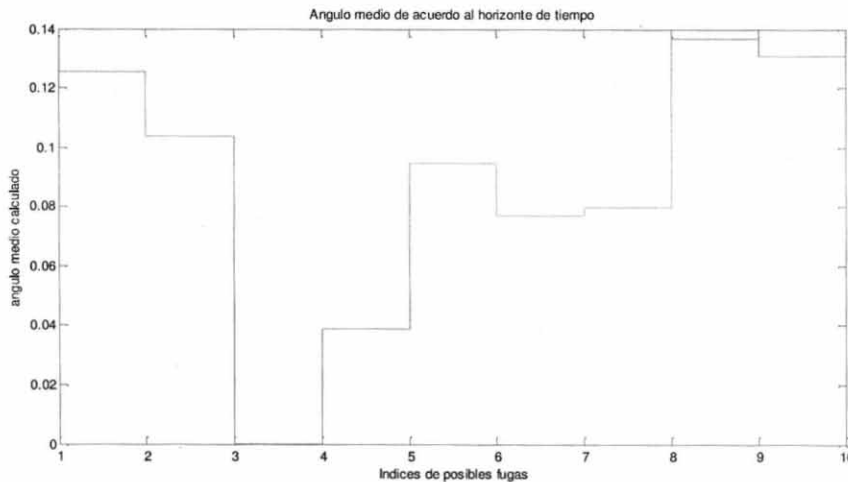


Fig. 38 Ángulo medio entre vectores a lo largo de 24 horas

- **Método de optimización por mínimos cuadrados**

De acuerdo con la optimización se obtienen los siguientes tamaños de fuga y errores para cada posible fuga, en la Fig. 39-b se observa que el índice con el menor error es el número 3, lo que significa que es en el nodo 12 en el que ocurre la fuga, una vez sabiendo el índice, se sabe que le corresponde un tamaño de fuga de aproximadamente 0.19 lps tal como se ve en la figura Fig. 39-a.

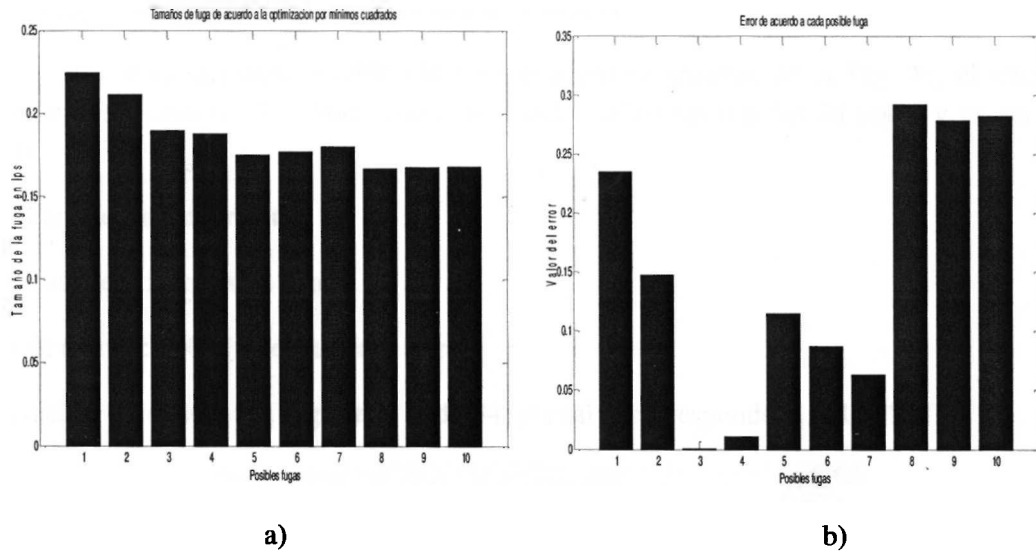


Fig. 39 a) Tamaños de fuga para minimizar el error b) Error en cada posible fuga

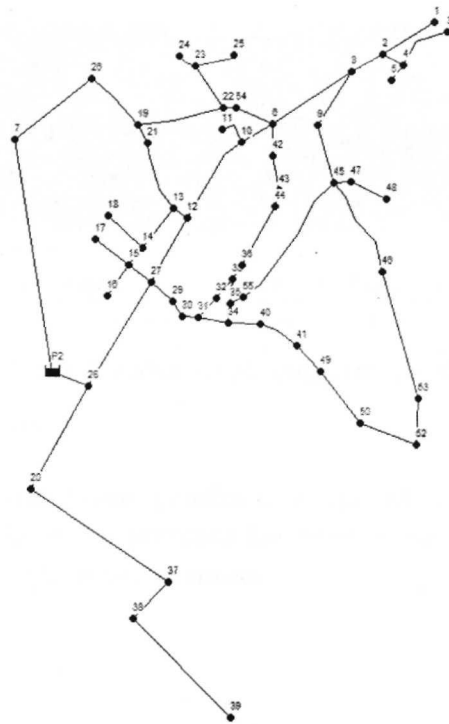


Fig. 40 Tercer red de aplicación - Quebra

5.2.3 Aplicación en la tercer red – Quebra

La tercer red de aplicación tiene como objetivo comprobar que los métodos programados funcionan para una red de mayor tamaño, así mismo se pretende tener una manera de comparar el funcionamiento entre cada una de las configuraciones de redes, y saber si esto repercute de alguna manera en la detección propuesta.

La red fue diseñada de acuerdo a la propuesta que se encuentra en la página web de EPANET [24], en la Fig. 40 se muestra la configuración de la misma.

El patrón de demanda establecido para esta red se muestra en la Fig. 41, el intervalo de muestreo en este caso es de 1 hora, con una simulación de las 0 a las 24 horas y un total de 25 muestras.

Parámetros importantes:

Nodos de la red: 55 nodos en total.

Divisor de tiempo: 3600 (muestras cada hora)

Demostración: Se simula una fuga en el nodo 34, al cual le corresponde el índice 32.

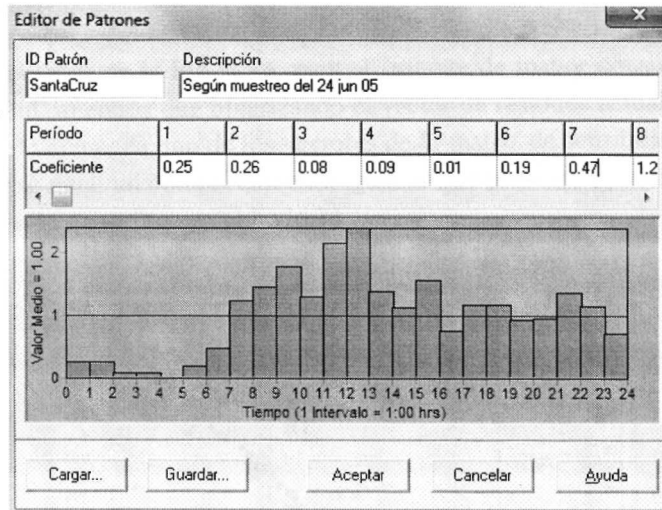


Fig. 41 Patrón de demanda para la red Quebra

MATRICES DE SENSIBILIDAD

Las matrices de sensibilidad correspondientes a esta red se calculan con un tamaño de fuga nominal de 0.01 lps. En la Fig. 42 se muestran las matrices de sensibilidad de las dos maneras posibles, tal como se describió en las redes anteriores.

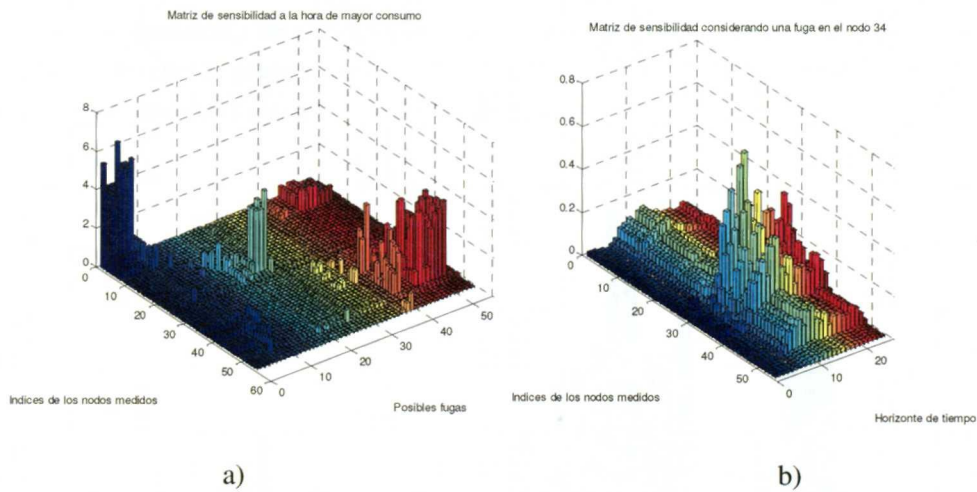


Fig. 42 Matrices de sensibilidad para la red Quebra a) matriz de sensibilidad en el instante de mayor consumo b) matriz de sensibilidad aplicando una fuga en el nodo 34

Aplicación de métodos simulando una fuga en el nodo 34 con magnitud de 0.008 lps.

- **Matriz binarizada**

Como se observa en la Fig. 43-a, para el instante de mayor consumo de la red, se tiene la matriz de sensibilidad, mientras que binarizando el vector de residuos actual, para el mismo instante, es posible compararlo con cada uno de los vectores de la matriz de sensibilidad, con esto el resultado es que actualmente se tiene un comportamiento igual al que presenta la matriz de sensibilidad con el índice de fuga 32, esto es una fuga en el nodo 34.

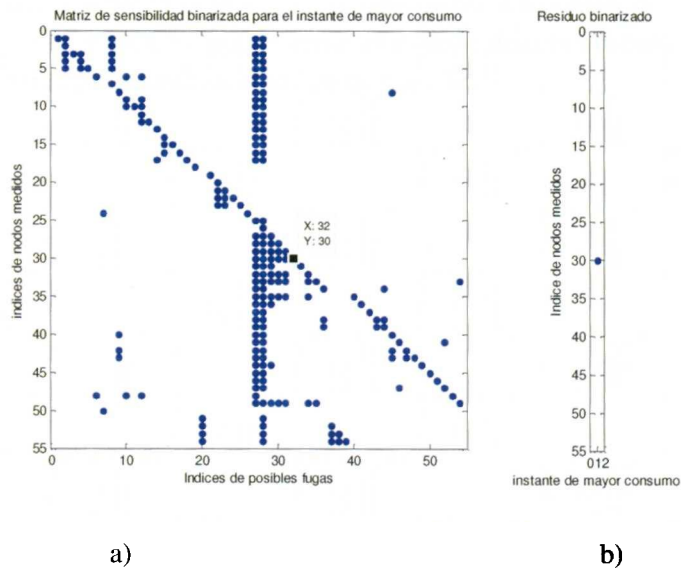


Fig. 43 Matrices de sensibilidad binarizadas para la red Quebra a) Matriz de sensibilidad binarizada para el instante de mayor consumo b) Vector de residuo actual binarizado en el instante de mayor consumo

- **Correlación de datos**

De acuerdo a la sumatoria de correlaciones, analizando el índice con mayor correlación entre las fugas posibles se obtiene el gráfico presentado en la Fig. 44, donde queda confirmado que hay una fuga en el índice 32, que corresponde al nodo 34 de la red.

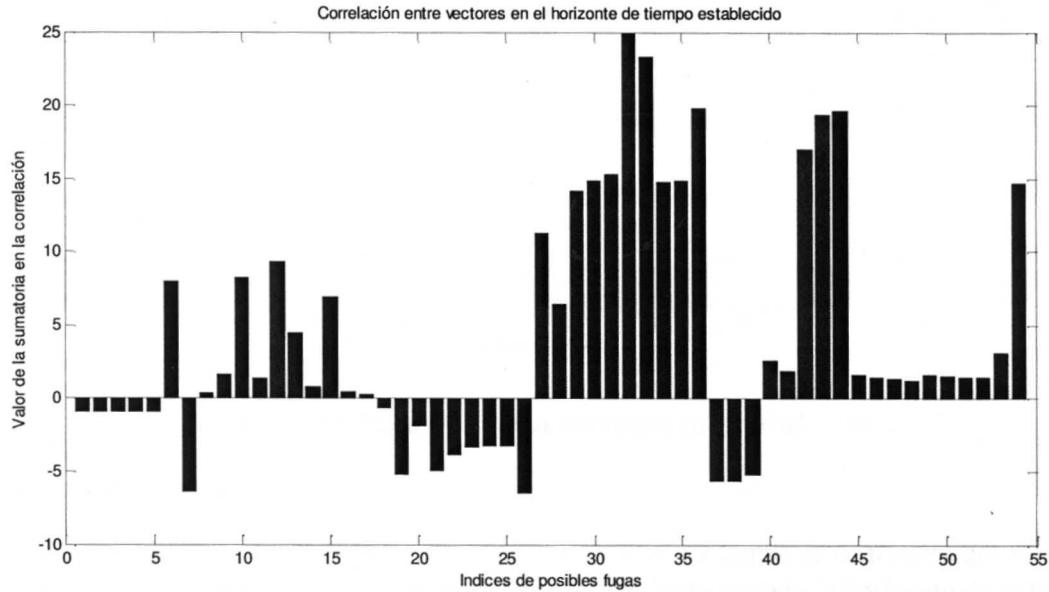


Fig. 44 Correlación de vectores en la red Quebra

- **Distancia euclidiana**

De la misma manera se obtiene el gráfico correspondiente a la medición de distancia euclidiana, el cual se muestra en la Fig. 45. Como puede verse, el método detecta también que la menor distancia durante el horizonte de tiempo, ocurre en el índice de fuga 32.

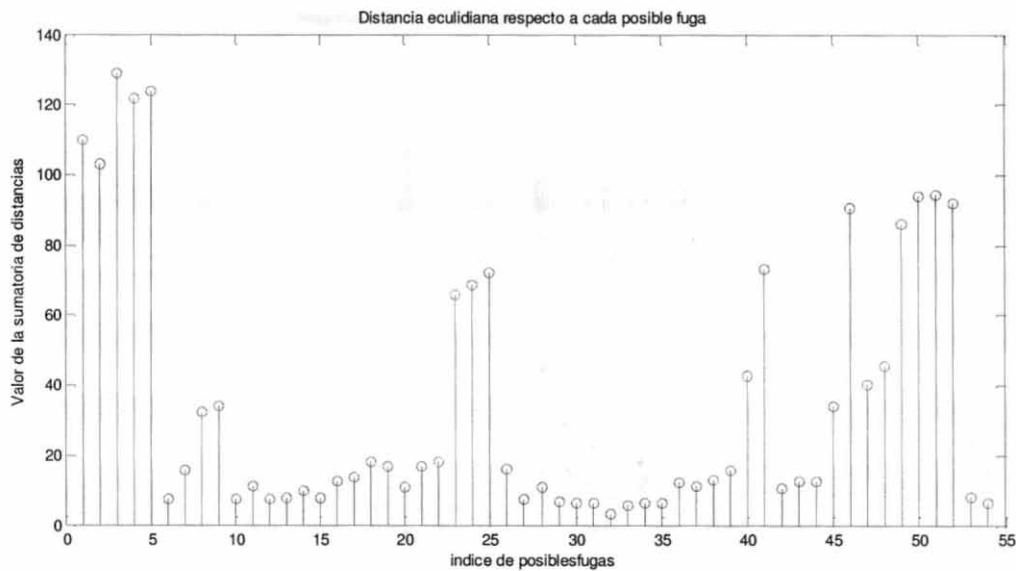


Fig. 45 Resultados de distancia euclidiana en la red de Quebra

- **Ángulo entre vectores**

El resultado obtenido para este método se muestra en la Fig. 46, donde se demuestra que el índice 32 finaliza con el ángulo medio menor luego de calcularlo a lo largo de todo el horizonte de tiempo.

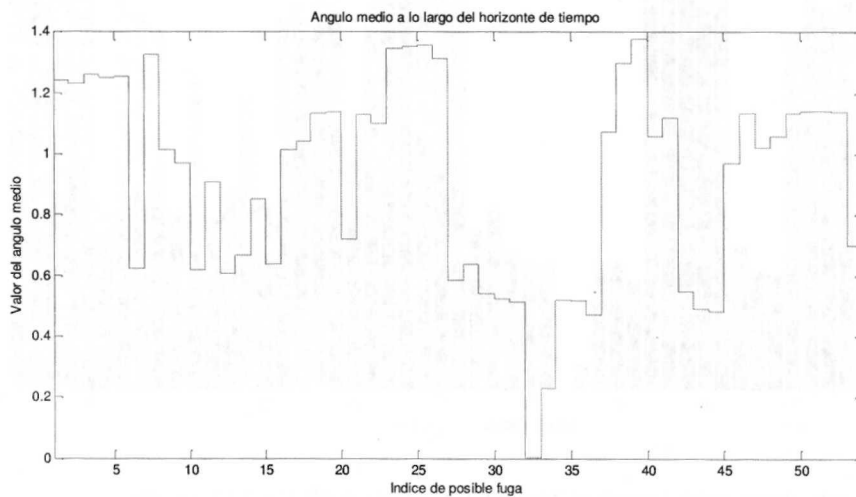


Fig. 46 Ángulo medio para cada posible fuga a lo largo del horizonte de tiempo en la red Quebra

- **Optimización por mínimos cuadrados**

Por último se prueba la efectividad del método de mínimos cuadrados para la fuga propuesta, como resultado se obtienen la Fig. 47 y Fig. 48 que representan los tamaños de fuga y el tamaño del error cuadrático respectivamente, por lo tanto siendo que el menor error se encuentra en el índice 32, significa que hay una fuga en el nodo 34 de magnitud aproximada a la que muestra la Fig. 47.

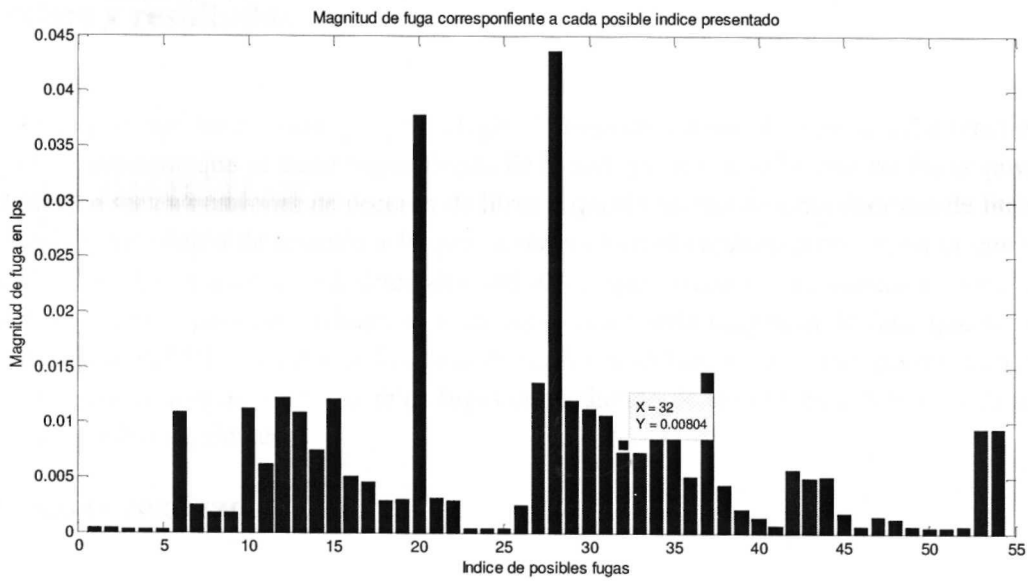


Fig. 47 Magnitudes de fuga en Quebra

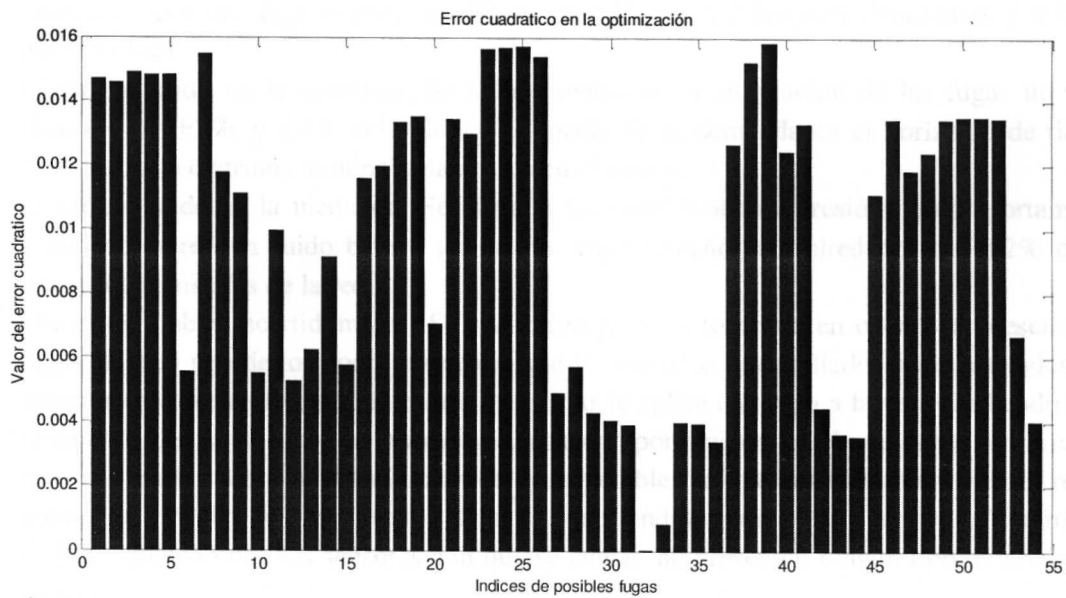


Fig. 48 Tamaño del error en la optimización por mínimos cuadrados

6. Pruebas y resultados

Es importante hacer notar que para elegir el rango de valores de fuga se debe tener en cuenta el rango de demandas que se tiene dependiendo de la red, ya que se sabe que las fugas presentes en una red pueden ser en ocasiones de decenas de litros o quizás apenas de unas decimas de litros, con lo cual se realiza un estudio de acuerdo a lo que se observó en el capítulo anterior, en el que se define hasta qué punto una fuga no será detectable debido a que pueda ser considerada como ruido de medición o demanda, para este trabajo, se sitúa como ruido toda magnitud de fuga que se encuentre en valores dentro del 5% del valor de la demanda media en el horizonte de tiempo previsto, con esto, se eligen valores congruentes con posibles fugas dependiendo de la configuración de cada red, como se ve en las pruebas siguientes.

6.1 Pruebas realizadas

Para cada red se probaron cada uno de los métodos dentro de los siguientes escenarios:

1. Efecto de magnitud de la fuga (considerando que las matrices de sensibilidad fueron calculadas con una fuga nominal de 50 *lps* para Hanoi, 0.2 *lps* para Benchmark y 0.01 *lps* para Quebra)
2. Efecto de ruido en la demanda: Se aplica dentro de la simulación de las fugas un ruido aleatorio de $\pm 2\%$, y $\pm 4\%$ del valor de la media de la demanda en el horizonte de tiempo analizado a la demanda nominal establecida en el patrón.
3. Efecto de ruido en la medición: Se añade a las mediciones de presión de comportamiento actual de la red un ruido blanco gaussiano, cuyo tamaño está alrededor del $\pm 2\%$ de las presiones nominales de la red.
4. Efecto de ambas incertidumbres: Se realizaron pruebas tomando en cuenta la presencia de fugas en cada uno de los nodos, sabiendo que los métodos desarrollados están pensados para detectar únicamente fugas simples, es decir, solo se aplica una fuga a la vez, añadiendo ruido tanto en la demanda como en la medición, este comportamiento es el que mejor representa el lado real de las redes de distribución de agua potable, ya que como es bien sabido, resulta imposible modelar con exactitud la demanda que tendrá una red de usuarios, así también es muy complicado que los sensores con que se cuenta no presenten ningún tipo de error en la medición.
5. Pruebas con magnitudes aleatorias, en nodos aleatorios (aplicando una fuga a la vez) con y sin ruido: Para esta última prueba, se proponen una serie de nodos con fuga elegidos aleatoriamente, a los cuales se aplicará una magnitud de fuga aleatoria definida entre los límites siguientes dependiendo de la red en cuestión:
Hanoi: 15 pruebas con fugas entre 20 y 80 *lps*.
Benchmark: 15 pruebas con fugas entre 0.1 y 1 *lps*.
Quebra: 15 pruebas con fugas entre 0.01 y 0.1 *lps*.
Las magnitudes de ruido estarán definidas entre 1 y 3 % del valor nominal correspondiente a la demanda media y a la presión nominal de la red correspondiente.

Las pruebas se detallan dependiendo de la red que se tenga en cuenta en la presente sección. En el apéndice A se encuentran ordenadas las tablas de resultados de las pruebas aplicadas a la red de Hanoi, cabe destacar que las mismas tablas se tienen para las otras redes, en las que es posible observar exactamente en qué fuga se tienen errores, para así hacer la comparación mas válida. Para el análisis de cada uno de los resultados se calcula la eficiencia de cada método en cada tipo de prueba y para cada red, dicho cálculo se realiza sumando el número de pruebas en las que se consiguió una detección correcta y dividiendo el resultado entre el número de pruebas realizadas, transformando después ese dato en porcentaje.

A. Pruebas en la red de Hanoi

Para analizar el efecto que tiene en los métodos de detección el cambio en la magnitud de las fugas respecto a aquellas utilizadas para el diseño de las matrices de sensibilidad, se propuso realizar análisis en cada una de las redes de prueba cambiando el tamaño de la fuga hacia valores menores y mayores a la fuga nominal.

1) PRUEBAS DE EFECTO DE MAGNITUD DE FUGA

Suponiendo que la red tiene un comportamiento ideal, es decir que las mediciones son exactas y las demandas obedecen el patrón indicado, se realizan pruebas partiendo de la fuga nominal y variando el valor hacia arriba o abajo. En la Tabla 5 se observa la eficiencia de cada uno de los métodos probados para los escenarios diseñados.

% EFICIENCIA POR MÉTODO					
PRUEBA DE EFECTO DEL TAMAÑO DE LA FUGA					
TAMAÑO DE FUGA	BINARIZACIÓN	CORRELACIÓN	DISTANCIA	ÁNGULO	OPTIMIZACIÓN
50.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1.00	100.00	96.77	3.23	100.00	100.00
10.00	100.00	96.77	3.23	100.00	100.00
20.00	100.00	100.00	3.23	100.00	100.00
30.00	100.00	100.00	6.45	100.00	100.00
40.00	100.00	100.00	32.26	100.00	100.00
60.00	100.00	100.00	54.84	100.00	100.00
70.00	100.00	96.77	45.16	100.00	100.00
80.00	100.00	100.00	38.71	100.00	100.00
90.00	100.00	100.00	32.26	100.00	100.00
EFICIENCIA MEDIA	100.00	99.02	17.12	100.00	100.00

Tabla 5 Eficiencia ante cambio en magnitudes de fuga

2) PRUEBAS DE EFECTO DE RUIDO EN LA DEMANDA

En la Tabla 6 se muestra el resultado de las pruebas realizadas aplicando un ruido en la demanda con un valor de 2% de la demanda media a cada instante de tiempo, para el cual se aplicó la fórmula (90).

$$rango_{ruido} = \frac{0.2}{97} (\sum_{i=1}^{97} D_i) \quad (90)$$

Donde:

D_i Representa la demanda actual de la red durante cada instante de medición

De acuerdo a la formula (85), se sabe que los métodos no podrán detectar fugas menores a la magnitud de ruido en la demanda, sabiendo que la fuga se calcula en un horizonte de tiempo, se tiene que para la red de Hanoi, la menor fuga detectable ante un ruido en la demanda de 2% será del valor máximo calculado en el vector de rango de ruido tal como se muestra en la formula (91).

$$f_{min} = \max(rango_{ruido}) \quad (91)$$

Por lo cual, se elimina la fuga de 1 *lps* que se probó en la tabla de efecto de magnitudes de fuga, ya que se tiene el conocimiento de que no será detectable por los métodos, o al menos no con la eficiencia deseada.

La Tabla 7 contiene los resultados obtenidos ante un análisis similar al descrito anteriormente pero considerando un ruido mayor al utilizado, es decir, alcanzando un 4% del valor medio de la demanda a lo largo del horizonte de tiempo.

% EFICIENCIA POR MÉTODO					
PRUEBA DE EFECTO DEL RUIDO EN LA DEMANDA CON VALOR DEL 2%					
TAMAÑO DE FUGA	BINARIZACIÓN	CORRELACIÓN	DISTANCIA	ÁNGULO	OPTIMIZACIÓN
50.00	83.87	96.77	100.00	100.00	90.32
10.00	48.39	93.55	3.23	96.77	83.87
20.00	61.29	96.77	3.23	100.00	83.87
30.00	74.19	96.77	6.45	100.00	93.55
40.00	83.87	96.77	35.48	100.00	96.77
60.00	87.10	96.77	58.06	100.00	96.77
70.00	87.10	100.00	45.16	100.00	96.77
80.00	90.32	100.00	38.71	100.00	100.00
EFICIENCIA MEDIA	75.54	97.16	19.86	99.59	92.56

Tabla 6 Eficiencia ante ruido de 2% en la demanda

3) EFECTO DE RUIDO EN LA MEDICIÓN

La Tabla 8 muestra los resultados obtenidos cuando se añade ruido blanco gaussiano con una magnitud máxima de 2% de la presión nominal de la red, a la medición de presión actual de la red. De acuerdo a la formula (87) se sabe que la mínima fuga detectable en presencia de ruido en las mediciones depende de la matriz de sensibilidad y el grado de ruido que se tenga, por lo que de acuerdo al ruido que se aplica a la red, se sabe que no es posible detectar con exactitud fugas menores a los 2 *lps* aproximadamente.

% EFICIENCIA POR MÉTODO					
PRUEBA DE EFECTO DEL RUIDO EN LA DEMANDA CON VALOR DEL 4%					
TAMAÑO DE FUGA	BINARIZACIÓN	CORRELACIÓN	DISTANCIA	ÁNGULO	OPTIMIZACIÓN
50.00	74.19	100.00	96.77	100.00	90.32
10.00	45.16	77.42	3.23	87.10	67.74
20.00	54.84	90.32	3.23	96.77	83.87
30.00	58.06	96.77	6.45	100.00	90.32
40.00	64.52	96.77	41.94	100.00	87.10
60.00	80.65	96.77	58.06	100.00	87.10
70.00	80.65	96.77	45.16	100.00	96.77
80.00	83.87	100.00	38.71	100.00	96.77
EFICIENCIA MEDIA	66.35	94.07	20.19	97.89	87.04

Tabla 7 Eficiencia ante ruido de 4% en la demanda

% EFICIENCIA POR MÉTODO					
PRUEBA DE EFECTO DEL RUIDO EN LA MEDICIÓN CON VALOR DEL 2%					
TAMAÑO DE FUGA	BINARIZACIÓN	CORRELACIÓN	DISTANCIA	ÁNGULO	OPTIMIZACIÓN
50.00	58.06	100.00	100.00	100.00	100.00
10.00	35.48	80.65	3.23	93.55	90.32
20.00	38.71	93.55	3.23	96.77	90.32
30.00	48.39	96.77	6.45	100.00	96.77
40.00	51.61	90.32	32.26	100.00	100.00
60.00	54.84	100.00	54.84	100.00	100.00
70.00	61.29	96.77	45.16	100.00	100.00
80.00	61.29	96.77	38.71	100.00	96.77
EFICIENCIA MEDIA	50.31	94.15	19.48	98.76	96.69

Tabla 8 Eficiencia ante ruido en la medición

4) EFECTO DE RUIDO EN LA DEMANDA Y EN LA MEDICIÓN

El escenario más real que puede crearse, es aquel en el que se considera que puede haber ruido en las mediciones y en la demanda, ya que como se sabe, no es posible modelar exactamente la demanda que se tendrá durante el día, sólo se puede modelar un patrón lo más cercano a la realidad, y de la misma manera es muy probable que las mediciones que se tienen en los sensores no sean siempre 100% exactas, la Tabla 9 muestra la eficiencia obtenida una vez que se aplica ruido en ambas situaciones, los valores de ruido aplicados están en el orden de $\pm 2\%$ de la media de la demanda y $\pm 2\%$ de las presiones nominales a la medición actual. Analizando la fórmula (89) se sabe que para este caso la mínima fuga detectable tendrá un orden similar a los anteriores, por lo cual se prueban la misma cantidad de mediciones.

1) PRUEBAS ALEATORIAS

Como último experimento, se proponen las pruebas aleatorias, que constan de programar 15 fugas simples (una a la vez) en cualquiera de los nodos, sin saber en el que ocurrirá, así como sin tener en cuenta cuál será el tamaño de la fuga sabiendo únicamente que estará en un umbral de 20 a 80 *lps*, esto mediante magnitudes y valores aleatorios. Las pruebas se realizan en presencia y ausencia de ruido y se obtienen los siguientes resultados:

EFICIENCIA POR MÉTODO					
PRUEBA DE EFECTO DEL RUIDO EN LA DEMANDA Y EN LA MEDICIÓN CON VALOR DE 2% PARA AMBAS					
TAMAÑO DE FUGA	BINARIZACIÓN	CORRELACIÓN	DISTANCIA	ÁNGULO	OPTIMIZACIÓN
50.00	51.61	96.77	100.00	100.00	96.77
10.00	38.71	83.87	3.23	90.32	83.87
20.00	38.71	93.55	3.23	96.77	87.10
30.00	38.71	90.32	6.45	96.77	90.32
40.00	51.61	96.77	32.26	100.00	100.00
60.00	58.06	96.77	54.84	100.00	93.55
70.00	58.06	96.77	45.16	100.00	96.77
80.00	61.29	96.77	35.48	100.00	100.00
EFICIENCIA MEDIA	48.76	93.84	19.27	97.93	93.38

Tabla 9 Eficiencia aplicando ruido tanto en la demanda como en la medición actual

EFICIENCIA EN PRUEBAS ALEATORIAS - HANOI					
PRUEBA	MÉTODO BINARIZACIÓN	MÉTODO CORRELACIÓN	MÉTODO DISTANCIA	MÉTODO ÁNGULO	MÉTODO OPTIMIZACIÓN
<i>Sin ruido</i>	100.00	93.33	33.33	100.00	100.00
<i>Con ruido en la demanda</i>	66.67	66.67	46.67	100.00	93.33
<i>Con ruido en la medición</i>	46.67	60.00	60.00	100.00	100.00
<i>Con ambas incertidumbres</i>	46.67	53.33	46.67	100.00	100.00

Tabla 10 Eficiencia en pruebas aleatorias aplicadas a la Red Hanoi

Los resultados completos se detallan en el apéndice D, los cuales incluyen las magnitudes de fuga aplicadas aleatoriamente y la detección realizada por cada uno de los métodos.

Interpretación de resultados en Hanoi

PARTICULARIDADES DE LA RED – EFECTOS DE LA CONFIGURACIÓN

Debido a la configuración que tiene la red de Hanoi, presenta un inconveniente para la detección de fugas en el nodo 2, ya que al ser el primer nodo de la red, y encontrarse conectado directamente con el embalse de abastecimiento, se convierte en un nodo con tratamiento especial, es decir, cualquier fuga que se presenta en la red afecta de igual manera a ese nodo, por lo que el aislamiento se torna complicado. Se ha establecido que las variaciones de presión son muy pequeñas al momento de ocurrir las fugas, por lo tanto, cuando se presenta una fuga en el nodo 1, los métodos, en especial el de correlación tienen dificultades para detectar con exactitud el punto en el que dicha

fuga está ocurriendo. En la Fig. 49 se ve claramente el hecho de que el nodo 2 se encuentra en una posición especial en comparación con los demás nodos de la red.

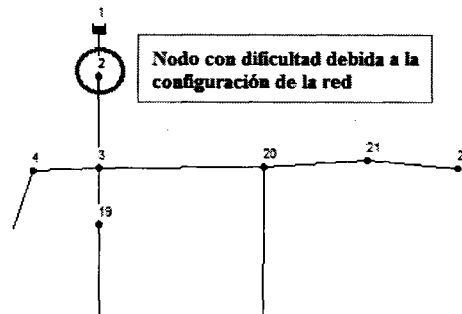


Fig. 49 Particularidad del nodo 2 de la red de Hanoi

EFEECTO DE LA MAGNITUD

Los métodos de binarización, ángulo y optimización funcionan con una eficiencia de 100% sin importar el tamaño de fuga, el método de correlación se ve afectado por la particularidad de la red antes descrita; a excepción de este nodo, el método logra detectar cada una de las fugas aplicadas al resto de la red con una eficiencia de 100%, esto puede revisarse en el apéndice A. El método de la distancia euclidiana resulta muy afectado a los cambios de magnitud en la fuga.

EFEECTO DE RUIDO EN LA DEMANDA

Para este caso, los métodos de binarización y distancia euclidiana no entregan buenos resultados, por lo cual nos concentraremos en los tres métodos restantes. El método de correlación resulta en este caso mejor que el de optimización, sin embargo el que entrega los resultados más satisfactorios es el método del ángulo entre vectores, pues aún con la dificultad que presenta el nodo 2, el método del ángulo hace posible la detección en la fuga en este nodo aun considerando el ruido existente.

EFEECTO DEL RUIDO EN LA MEDICIÓN

Cuando se tiene ruido en la medición, el efecto en el método de correlación y el de optimización es inverso, ya que en este caso, es más efectivo el método de optimización, sin embargo, la efectividad del método del ángulo sigue siendo mayor para todos los casos.

EFEECTO DE AMBAS INCERTIDUMBRES

Es notorio que en el caso de aplicación de ruido en ambos casos, la eficiencia del método de correlación y el de optimización son similares es decir, las ventajas que presenta el método de correlación ante la presencia de ruido en la medición, son similares a las que presenta el método de optimización ante la presencia de ruido en la demanda, pero aún así, sigue siendo más efectivo el método de ángulo entre vectores. Es importante destacar que el nodo con particularidades de esta red, afecta también al momento de incluir ruido en la red, es decir, que sin la existencia de éste, se tendrían aún mejores resultados con los métodos probados.

B. Pruebas en la red de Benchmark

1) PRUEBAS DE EFECTO DE MAGNITUD DE FUGA

% EFICIENCIA POR MÉTODO					
PRUEBA DE EFECTO CAMBIO EN LA MAGNITUD DE LA FUGA					
TAMAÑO DE FUGA	BINARIZACIÓN	CORRELACIÓN	DISTANCIA	ÁNGULO	OPTIMIZACIÓN
0.2	100	100	100	100	100
0.1	100	100	10	100	100
0.3	100	100	20	100	100
0.7	100	100	10	100	100
2	90	100	10	100	100
EFICIENCIA MEDIA	97.91	100.00	18.21	100.00	100.00

Tabla 11 Resultados de efecto de magnitud de las fugas en la red Benchmark

2) PRUEBAS DE EFECTO DE RUIDO EN LA DEMANDA

% EFICIENCIA POR MÉTODO					
PRUEBA DE EFECTO DEL RUIDO EN LA DEMANDA CON VALOR DE 2%					
TAMAÑO DE FUGA	BINARIZACIÓN	CORRELACIÓN	DISTANCIA	ÁNGULO	OPTIMIZACIÓN
0.2	70	100	50	100	30
0.1	40	60	10	80	20
0.3	90	80	30	100	20
0.7	80	100	20	100	60
2	80	100	10	100	100
EFICIENCIA MEDIA	69.43	86.35	19.74	95.64	37.28

Tabla 12 Resultados aplicando ruido en la demanda

3) PRUEBAS DE EFECTO DE RUIDO EN LA MEDICIÓN

% EFICIENCIA POR MÉTODO					
PRUEBA DE EFECTO DE RUIDO EN LA MEDICIÓN CON VALOR DE 2%					
TAMAÑO DE FUGA	BINARIZACIÓN	CORRELACIÓN	DISTANCIA	ÁNGULO	OPTIMIZACIÓN
0.2	100	100	100	100	100
0.1	90	90	10	100	100
0.3	90	90	20	100	100
0.7	100	100	10	100	100
2	80	100	10	100	100
EFICIENCIA MEDIA	91.69	95.87	18.21	100.00	100.00

Tabla 13 Resultados del efecto de ruido en la medición

4) PRUEBAS DE EFECTO DE AMBAS INCERTIDUMBRES

% EFICIENCIA POR MÉTODO					
PRUEBA DE EFECTO DE RUIDO EN LA DEMANDA Y EN LA MEDICIÓN CON VALORES DE 2%					
TAMAÑO DE FUGA	BINARIZACIÓN	CORRELACIÓN	DISTANCIA	ÁNGULO	OPTIMIZACIÓN
0.2	60	90	70	100	20
0.1	60	90	10	90	10
0.3	70	90	40	100	50
0.7	80	90	10	100	80
2	80	100	10	100	100
EFICIENCIA MEDIA	69.43	91.92	19.47	97.91	38.07

Tabla 14 Resultados ante ambas incertidumbres en Benchmark

5) PRUEBAS ALEATORIAS

EFICIENCIA EN PRUEBAS ALEATORIAS - BENCHMARK					
PRUEBA	MÉTODO BINARIZACIÓN	MÉTODO CORRELACIÓN	MÉTODO DISTANCIA	MÉTODO ÁNGULO	MÉTODO OPTIMIZACIÓN
Sin ruido	100.00	100.00	26.67	100.00	100.00
Con ruido en la demanda	80.00	93.33	13.33	100.00	46.67
Con ruido en la medición	100.00	100.00	6.67	100.00	100.00
Con ambas incertidumbres	73.33	93.33	20.00	100.00	40.00

Tabla 15 Eficiencia en pruebas aleatorias aplicadas a la red de Benchmark

Interpretación de resultados en Benchmark

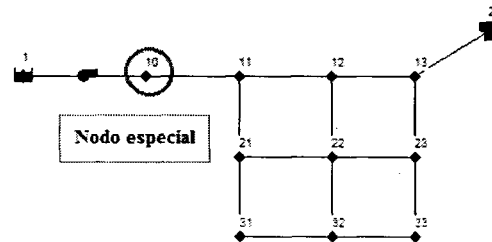


Fig. 50 Nodo especial debido a la configuración de la red.

De acuerdo con los análisis de datos realizados, se comprueba que cuando se tiene un nodo a la salida del embalse de abastecimiento, éste ocasiona que los cálculos por correlación no sean tan exactos como se esperaba, al igual que como se observó en el caso anterior. En la Fig. 50 se muestra como interviene la configuración de la red en la detección de las fugas.

Los métodos de binarización y distancia tienen el mismo comportamiento que para la red anteriormente probada. Mientras que el método de correlación mejora con respecto a las pruebas anteriores, el método de optimización tiene resultados menos satisfactorios, esto es debido a que se

tiene un número de muestras mucho menor, lo que ocasiona que el algoritmo de optimización utilizado no tenga datos suficientes para minimizar la función de costo. Otra de las cosas que se comprueban en esta red, es que el método que entrega mejores resultados sigue siendo el del ángulo entre vectores.

C. Pruebas en la red de Quebra

1) PRUEBAS DE EFECTO DE MAGNITUD DE FUGA

% EFICIENCIA POR MÉTODO					
PRUEBA DE EFECTO DEL TAMAÑO DE LA FUGA					
TAMAÑO DE FUGA	BINARIZACIÓN	CORRELACIÓN	DISTANCIA	ÁNGULO	OPTIMIZACIÓN
0.01	96.30	100.00	100.00	100.00	100.00
0.003	92.59	98.15	1.85	98.15	98.15
0.02	92.59	98.15	46.30	98.15	98.15
0.08	90.74	98.15	20.37	98.15	98.15
0.15	90.74	98.15	16.67	98.15	98.15
0.20	90.74	98.15	16.67	98.15	98.15
EFICIENCIA MEDIA	92.26	98.45	19.10	98.45	98.45

Tabla 16 Resultados de cambio en magnitud de la fuga en la red Quebra

2) PRUEBAS DE EFECTO DEL RUIDO EN LA DEMANDA

% EFICIENCIA POR MÉTODO					
PRUEBA DE EFECTO DEL RUIDO EN LA DEMANDA CON VALORE DE 2%					
TAMAÑO DE FUGA	BINARIZACIÓN	CORRELACIÓN	DISTANCIA	ÁNGULO	OPTIMIZACIÓN
0.01	96.30	100.00	100.00	100.00	100.00
0.003	92.59	98.15	1.85	98.15	98.15
0.02	92.59	98.15	46.30	98.15	98.15
0.08	90.74	98.15	20.37	98.15	98.15
0.15	90.74	98.15	16.67	98.15	98.15
0.20	90.74	98.15	16.67	98.15	98.15
EFICIENCIA MEDIA	92.26	98.45	19.10	98.45	98.45

Tabla 17 Resultados ante ruido en la demanda

3) PRUEBAS DE EFECTO DE RUIDO EN LA MEDICIÓN

% EFICIENCIA POR MÉTODO					
PRUEBA DE EFECTO DEL RUIDO EN LA MEDICIÓN CON VALOR DE 2%					
TAMAÑO DE FUGA	BINARIZACIÓN	CORRELACIÓN	DISTANCIA	ÁNGULO	OPTIMIZACIÓN
0.01	57.41	90.74	96.30	96.30	94.44
0.003	50.00	75.93	1.85	79.63	74.07
0.02	64.81	83.33	46.30	92.59	96.30
0.08	79.63	96.30	20.37	98.15	98.15
0.15	83.33	98.15	16.67	98.15	98.15
0.20	87.04	96.30	16.67	98.15	98.15
EFICIENCIA MEDIA	68.95	89.75	18.98	93.57	92.76

Tabla 18 Resultados obtenidos ante ruido en la medición en Quebra

4) PRUEBAS DE EFECTO DE AMBAS INCERTIDUMBRES

% EFICIENCIA POR MÉTODO					
PRUEBA DE EFECTO DEL RUIDO EN LA DEMANDA Y LA MEDICIÓN CON VALORES DE 2%					
TAMAÑO DE FUGA	BINARIZACIÓN	CORRELACIÓN	DISTANCIA	ÁNGULO	OPTIMIZACIÓN
0.01	62.96	88.89	98.15	92.59	88.89
0.003	46.30	79.63	1.85	81.48	85.19
0.02	66.67	94.44	46.30	94.44	94.44
0.08	79.63	98.15	20.37	98.15	98.15
0.15	83.33	96.30	16.67	98.15	98.15
0.20	85.19	96.30	16.67	98.15	98.15
EFICIENCIA MEDIA	69.20	92.05	19.04	93.63	93.69

Tabla 19 Resultados ante el efecto de ambas incertidumbres

5) PRUEBAS ALEATORIAS

EFICIENCIA EN PRUEBAS ALEATORIAS - QUEBRA					
PRUEBA	MÉTODO BINARIZACIÓN	MÉTODO CORRELACIÓN	MÉTODO DISTANCIA	MÉTODO ÁNGULO	MÉTODO OPTIMIZACIÓN
<i>Sin ruido</i>	86.67	93.33	26.67	93.33	93.33
<i>Con ruido en la demanda</i>	86.67	100.00	33.33	100.00	100.00
<i>Con ruido en la medición</i>	93.33	93.33	40.00	93.33	93.33
<i>Con ambas incertidumbres</i>	66.67	100.00	13.33	100.00	100.00

Tabla 20 Eficiencia en pruebas aleatorias aplicadas a la red de Quebra

Interpretación de resultados en Quebra

Como puede verse en las tablas, al no tener en esta red un nodo con particularidades como sucedió en las redes anteriores, el método de correlación no se encuentra en desventaja contra el de optimización y el método del ángulo, sin embargo puede verse que el método del ángulo sigue ofreciendo el mejor resultado, ya que ante cualquier tipo de ruido tiene resultados satisfactorios y es el método más confiable para la detección de fugas.

PARTICULARIDADES DE LA RED

Luego del análisis de cada uno de los resultados por nodo en la red de Quebra, puede notarse que hay dos nodos con comportamientos muy similares, por lo que ocurre muy a menudo en las pruebas, que los métodos detectan las fugas en alguno de los dos, siendo éste el que se vea más afectado por la fuga, por lo que muchos de los análisis se encuentran errados únicamente por este par de nodos, que realmente se ubican muy cerca uno del otro; esto se debe posiblemente a la manera en que están establecidas las demandas en la red, así como las ubicaciones de nodos con demandas iguales, es decir, si hay nodos muy cercanos que tienen establecidos parámetros iguales, muy probablemente los sistemas de detección tendrán problemas para encontrar fugas en dichos nodos. En la Fig. 51 se muestran los nodos de los que se habla, como puede verse, están muy cerca entre sí, y las demandas base de ambos es de 0.2 lps.

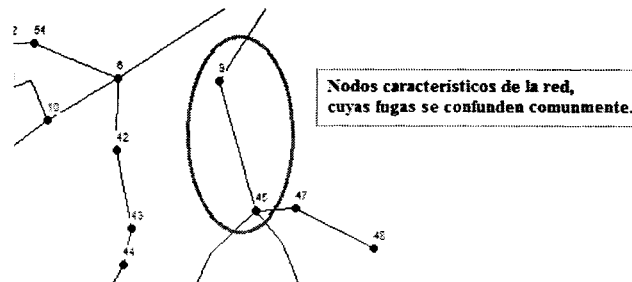


Fig. 51 Nodos con confusiones comunes a lo largo de las pruebas

6.2 Discusión de resultados

Con el fin de entender los resultados a los que se llegó de acuerdo a los métodos propuestos, se elaboran las tablas: Tabla 21, Tabla 22, Tabla 23, Tabla 24 y Tabla 25 en la cuales se describen las eficiencias de cada método de acuerdo a la red en cuestión y la eficiencia media del método en general, esto con el fin de comparar entre ellos cual tiene el mejor desempeño para cada situación.

<i>Método de binarización</i>				
	<i>Red Hanoi</i>	<i>Red Benchmark</i>	<i>Red Quebra</i>	<i>Eficiencia media</i>
<i>Magnitud</i>	100.00	97.91	92.26	96.67
<i>Ruido en la demanda</i>	75.54	69.43	92.26	78.51
<i>Ruido en la medición</i>	50.31	91.69	68.95	68.26
<i>Ruido en ambas</i>	48.76	69.43	69.20	61.64

Tabla 21 Eficiencia final del método de binarización

Método de correlación				
	<i>Red Hanoi</i>	<i>Red Benchmark</i>	<i>Red Quebra</i>	<i>Eficiencia media</i>
Magnitud	99.02	100.00	98.45	99.16
Ruido en la demanda	97.16	86.35	98.45	93.83
Ruido en la medición	94.15	95.87	89.75	93.22
Ruido en ambas	93.84	91.92	92.05	92.60

Tabla 22 Eficiencia final del método de correlación

Método de distancia euclidiana				
	<i>Red Hanoi</i>	<i>Red Benchmark</i>	<i>Red Quebra</i>	<i>Eficiencia media</i>
Magnitud	17.12	18.21	19.10	18.12
Ruido en la demanda	19.86	19.74	19.10	19.56
Ruido en la medición	19.48	18.21	18.98	18.88
Ruido en ambas	19.27	19.47	19.04	19.26

Tabla 23 Eficiencia final del método de distancia euclidiana

Método de ángulo entre vectores				
	<i>Red Hanoi</i>	<i>Red Benchmark</i>	<i>Red Quebra</i>	<i>Eficiencia media</i>
Magnitud	100.00	100.00	98.45	99.48
Ruido en la demanda	99.59	95.64	98.45	97.88
Ruido en la medición	98.76	100.00	93.57	97.41
Ruido en ambas	97.93	97.91	93.63	96.47

Tabla 24 Eficiencia final del método de ángulo entre vectores

Método de optimización				
	<i>Red Hanoi</i>	<i>Red Benchmark</i>	<i>Red Quebra</i>	<i>Eficiencia media</i>
Magnitud	100.00	100.00	98.45	99.48
Ruido en la demanda	92.56	37.28	98.45	69.78
Ruido en la medición	96.69	100.00	92.76	96.44
Ruido en ambas	93.38	38.07	93.69	69.32

Tabla 25 Eficiencia final del método de optimización

De acuerdo a las tablas anteriores, los resultados pueden resumirse como se muestra en la Tabla 26 de acuerdo al mejor desempeño en cada caso, los parámetros en la tabla contienen valores entre 1 y 5, siendo 1 el mejor método encontrado para el efecto en cuestión y 5 el método que entrega los resultados menos satisfactorios para el caso presente. Como puede verse en dicha tabla, el mejor método en todos los sentidos resulta ser el método del ángulo entre vectores, mientras que el método de distancia, sólo puede utilizarse cuando la magnitud de la fuga sea muy similar a la utilizada en el diseño de las matrices de sensibilidad.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS					
CARACTERÍSTICA A DISCUTIR	MÉTODO				
	BINARIZACIÓN	CORRELACIÓN	DISTANCIA EUCLIDIANA	ÁNGULO ENTRE VECTORES	OPTIMIZACIÓN
<i>Efectividad ante cambio en magnitud de fuga</i>	4	3	5	<u>1</u>	2
<i>Eficiencia ante ruido en la medición</i>	3	2	5	<u>1</u>	4
<i>Eficiencia ante ruido en la demanda</i>	4	3	5	<u>1</u>	2
<i>Eficiencia ante incertidumbres tanto en la demanda como en la medición</i>	4	2	5	<u>1</u>	3
<i>Funcionamiento ante condiciones especiales de configuración de la red</i>	4	3	5	<u>1</u>	2

Tabla 26 Discusión de resultados por método de detección

7. Conclusiones

El diagnóstico de fugas en redes de agua es un ámbito poco explorado hasta la fecha, sin embargo a lo largo de este trabajo se han logrado desarrollar 5 diferentes métodos de detección, tomados a partir de ideas anteriormente aplicadas, pero dándoles un enfoque completamente distinto, los cuales han sido probados con 3 redes de distintas características, con lo cual se sabe que es posible encontrar la manera de reducir las fugas que hasta hoy en día son un gran problema. Cada uno de los métodos anteriormente descritos presenta ventajas y desventajas entre uno y otro, dependiendo de las características de la red en la que se aplican.

Para cada uno de los métodos aplicados se consiguió dar un enfoque distinto al que se había atacado hasta el momento, por medio del cual se aprovecha el comportamiento de la red durante un horizonte de tiempo determinado, y se logra establecer una manera de detectar fugas comparando el comportamiento normal (es decir en ausencia de fugas) contra los resultados de presión afectados por fugas en la red, mediante sensibilidades obtenidas teniendo en cuenta los patrones de demanda cambiantes a lo largo del horizonte de tiempo.

El método de binarización tiene la ventaja de relacionar datos en forma binaria, lo que da la oportunidad de averiguar en forma sencilla cuando un cambio de presión afecta o no a los nodos en cuestión, sin embargo, al ser un método que requiere establecer umbrales, se vuelve un tanto empírico, ya que un umbral puede funcionar muy bien para ciertas características del sistema mientras que para otras es posible que no logre detectar lo que sucede. Debido a esto, el método tiene resultados satisfactorios únicamente en escenarios ideales, es decir, en presencia de ruido la detección por binarización no resulta muy precisa.

El método de correlación de datos es uno de los mejores métodos encontrados, ya que tiene la ventaja de que analiza las características de los datos iniciales y luego las compara con las que tienen los datos actuales. De acuerdo a la similitud entre ambos es que decide dónde se encuentra ubicada la fuga, por lo cual, no le afecta mucho el cambio en magnitud de fuga ni el ruido en la demanda, sin embargo este método en particular tiene la desventaja de que en casos particulares que se presentan en ciertas configuraciones de la red, cuando un nodo se afecta por igual en ocurrencia de cualquier fuga, es imposible el cálculo de correlación ya que aparece como nula.

El método de distancia euclidiana, no entrega resultados satisfactorios salvo en los casos en que la fuga es de magnitud igual o muy similar a aquella con que se diseñaron las matrices de sensibilidad, la presencia de ruido en la demanda y en la medición no le afectan demasiado si se habla de la misma magnitud, pero el cambio de ésta ocasiona que la detección contenga demasiados errores.

En el método del ángulo entre vectores se encuentra el mejor método de detección analizado, ha sido uno de los logros más sorprendentes de este trabajo, pues es el método que menos se ha analizado anteriormente para trabajos de este tipo y fue el que entregó los mejores resultados, no se ve afectado por la presencia de ruido en gran cantidad, y además no le afecta la existencia de nodos con particularidades como los analizados en las 2 primeras redes.

Por último en el método de optimización al igual que el de correlación se convierte en uno de los mejores, tiene la ventaja de realizar el cálculo de la magnitud de la fuga a la vez que encuentra el nodo en el que se presenta, sin embargo, se ve afectado cuando no se tiene un número considerable de mediciones, como es el caso de la segunda red de prueba, que al ser una red muy pequeña, el número de datos es muy pequeño por lo que el método comete muchos errores en la detección, sin embargo, para redes mas grandes los resultados son realmente satisfactorios.

Entre los descubrimientos encontrados luego de las pruebas realizadas, se notó también que las configuraciones de la red intervienen también en el buen funcionamiento de los métodos, cuando hay nodos muy cercanos en igualdad de condiciones, puede verse que los métodos de detección pueden tener errores entre esos dos nodos.

Una cuestión importante también que se observó al finalizar las pruebas, es que es recomendable diseñar las matrices de sensibilidad con fugas pequeñas, esto ocasiona que los métodos sean más sensibles a los cambios y por lo tanto, las fugas mayores a las utilizadas en el diseño son fáciles de detectar; sin embargo, hay que tener en cuenta también que las magnitudes usadas para este fin, sean mayores que la fuga mínima detectable calculada de acuerdo al ruido esperado.

Trabajo Futuro

- Aplicar los métodos en una red en la que se tengan un menor número de sensores que nodos existentes, y observar si se tienen resultados similares a los obtenidos.
- Aplicar el método de ángulo dado que es el de mejores resultados a una red real de mayor extensión, con el fin de comprobar el funcionamiento del mismo ante un escenario con comportamiento real, no ideal, y no simulado.
- Encontrar maneras de diseñar las matrices de sensibilidad sin necesidad de simulación de fugas, pues esto vuelve el trabajo más complicado a la hora de trabajar con redes mucho más grandes.
- Realizar una modelación de la demanda basada en datos históricos dividiendo los usuarios de acuerdo al tipo de consumo que tienen, como puede ser industrial, casa habitación, escolar, ya que esto daría un patrón mucho más certero y con menos posibilidad de confusión entre fugas y demanda extra de los usuarios involucrados.
- Intentar extender los métodos a la detección de fugas simultáneas en redes de abastecimiento de agua.
- Averiguar el efecto de las dimensiones físicas que tienen los residuos y las sensibilidades que se analizan, dado que en el trabajo actual se tienen en espacios distintos.

APÉNDICE A
ALGORITMO DE DISEÑO DE MATRICES DE
SENSIBILIDAD

```

clear all
clc

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               DETECCIÓN DE FUGA POR MEDIO DE RESIDUOS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%abrir librería
loadlibrary('epanet2', 'epanet2');
matlabENopen('hanoi.inp', 'hano.txt', '');
Num_links = matlabENgetcount('EN_LINKCOUNT');
Num_nodos = matlabENgetcount('EN_NODECOUNT');

nodos_con_fuga =
{'2', '3', '4', '5', '6', '7', '8', '9', '10', '11', '12', '13', '14', '15', '16', '17', '18', '19', '20', '21', '22', '23', '24', '25', '26', '27', '28', '29', '30', '31', '32'}
;
nodos_con_med =
{'2', '3', '4', '5', '6', '7', '8', '9', '10', '11', '12', '13', '14', '15', '16', '17', '18', '19', '20', '21', '22', '23', '24', '25', '26', '27', '28', '29', '30', '31', '32'}
;
for n=1:length(nodos_con_fuga)
    index(n) = matlabENgetnodeindex(nodos_con_fuga{n});
end

for n=1:length(nodos_con_med)
    index_med(n) = matlabENgetnodeindex(nodos_con_med{n});
end

%Comenzar simulación hidraulica sin fugas
matlabENopenH();

P=0;
D=0;
F=0;
tstep=1;
%iniciar simulación hidraulica sin guardar datos
matlabENinith(10);
while tstep>0
    t=matlabENrunH();
    %establecer el tiempo de medición para cada 15 minutos
    tiempo=t/900;
    for i=1:length(nodos_con_med)
        P(index_med(i), tiempo+1)=matlabENgetnodevalue(i, 'EN_PRESSURE');
        D(index_med(i), tiempo+1)=matlabENgetnodevalue(i, 'EN_DEMAND');
    end
    for i=1:Num_links
        F(i, tiempo+1)=matlabENgetlinkvalue(i, 'EN_FLOW');
    end
    tstep=matlabENnextH(); %establece el siguiente tiempo de acuerdo a la
    sig cuenta de epanet
end

%Obtener las matrices de fugas posibles (P_FUGA1-->presiones con fuga en
el
%nodo con indice 1... etc

```

```

for m=1:length(index)
    matlabENsetnodevalue(index(m), 'EN_BASEDEMAND',50);
    P_FUGA=0;
    D_FUGA=0;
    F_FUGA=0;
    tstep=1;
    %iniciar simulación hidraulica sin guardar datos
    matlabENninitH(10);
    while tstep>0
        t=matlabENrunH();
        %establecer el tiempo de medición para cada 15 minutos
        tiempo=t/900;
        for i=1:length(nodos_con_med)
            P_FUGA(index_med(i),tiempo+1)=matlabENgetnodevalue(i,'EN_PRESSURE');
            D_FUGA(index_med(i),tiempo+1)=matlabENgetnodevalue(i,'EN_DEMAND');
        end
        for i=1:Num_links
            F_FUGA(i,tiempo+1)=matlabENgetlinkvalue(i,'EN_FLOW');
        end
        tstep=matlabENnextH(); %establece el siguiente tiempo de acuerdo a
la sig cuenta de epanet
    end
    %eval(['P_FUGA' num2str(m) '= P_FUGA;' ]);

    RES_FUGA=(P-P_FUGA)/50;%%% aislar tamaño de fuga

    %AUM=D_FUGA-D;
    %D_FUGASS(m)=struct('name',['D_FUGA_' num2str(m)], 'value', AUM);
    res_fugas(m) = struct('name',['RES_FUGAS_' num2str(m)], 'value',
RES_FUGA);
    matlabENsetnodevalue(index(m), 'EN_BASEDEMAND',0);
end
save('res_fugas.mat','res_fugas');

%FORMAR MATRICES PARA CADA HORA DEL DÍA

%el tiempo de muestreo considerado es de 15 min, lo que entrega un total
de
%97 muestras en una simulación de 24 horas

for j=1:tiempo+1
    for i=1:length(nodos_con_fuga)
        RES_HORA(:,i)=res_fugas(i).value(:,j);
    end
    RES_MUESTRA(j)=struct('name',['RES_MUESTRA' num2str(j)], 'value',
RES_HORA);
end

save('res_muestra.mat','RES_MUESTRA');

matlabENcloseH();
matlabENclose();
unloadlibrary('epanet2');

```

APÉNDICE B

ALGORITMO DE DETECCIÓN DE FUGAS BASADO EN LOS 5 MÉTODOS PROPUESTOS

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
%
%
%
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%

```

CONCENTRACIÓN DE MÉTODOS

se intenta aislar e identificar fugas simples

```

clear all
clc

```

```

%%% CARGAR DATOS

```

```

%PARTE EN COMÚN PARA TODOS LOS MÉTODOS

```

```

%abrir librería
loadlibrary('epanet2', 'epanet2');
matlabENopen('hanoi.inp', 'hano.txt', '');
Num_links = matlabENgetcount('EN_LINKCOUNT');
Num_nodos = matlabENgetcount('EN_NODECOUNT');

```

```

%Comenzar simulación hidraulica sin fugas
matlabENopenH();

```

```

nf={'5'};
iif=matlabENgetnodeindex(nf{1});
%carga de datos de funcionamiento normal
tstep=1; %iniciar simulación hidraulica sin guardar datos
nodos_de_red =
{'2','3','4','5','6','7','8','9','10','11','12','13','14','15','16','17','
18','19','20','21','22','23','24','25','26','27','28','29','30','31','32'}
;
% nodos_de_red = {'2','3','8','13','19','26','30','32'};

```

```

%obtener los indices de los nodos declarados arriba
for n=1:length(nodos_de_red)
    index(n) = matlabENgetnodeindex(nodos_de_red{n});
end

```

```

P=0;
D=0;
F=0;
matlabENinith(10);
while tstep>0
    t=matlabENrunH(); %establecer el tiempo de medición para cada 15
    minutos
    tiempo=t/900;
    for i=1:length(nodos_de_red)
        P(index(i),tiempo+1)=matlabENgetnodevalue(i,'EN_PRESSURE');
        D(index(i),tiempo+1)=matlabENgetnodevalue(i,'EN_DEMAND');
    end
    for i=1:Num_links
        F(i,tiempo+1)=matlabENgetlinkvalue(i,'EN_FLOW');
    end
end

```

```

    tstep=matlabENnextH(); %establece el siguiente tiempo de acuerdo a la
sig cuenta de epanet
end

%%obtener magnitud de ruido en las demandas
rango_ruido_dem=0;
for i=1:31
    rango_ruido_dem(i)=0.1*mean(D(i,:));
    signo_ruido(i)=1-2*round(rand);
end

% for ka=1:length(index)
ka=1;
matlabENninitH(10);
P_FUGA=0;
D_FUGA=0;
F_FUGA=0;

%obtener datos de la matriz de fuga actual
%se está considerado que la fuga está presente las 24 horas

% matlabENsetnodevalue(index(ka), 'EN_BASEDEMAND',50 );

tstep=1;
tiempo=0;

%iniciar simulación hidraulica donde se incluirá la fuga
while tstep>0

    %% FUGA ACTUAL
    matlabENsetnodevalue(iif, 'EN_BASEDEMAND',50 );

    t=matlabENrunH();
    %establecer el tiempo de medición para cada 15 minutos
    tiempo=t/900;
    for i=1:length(nodos_de_red)
        %% RUIDO EN LA DEMANDA
        % if rango_ruido_dem~=0
        %     matlabENsetnodevalue(index(i), 'EN_BASEDEMAND', (1-
2*(round(rand)))*rango_ruido_dem(i)*rand);
        % end
        P_FUGA(index(i),tiempo+1)=matlabENgetnodevalue(i,'EN_PRESSURE');
        D_FUGA(index(i),tiempo+1)=matlabENgetnodevalue(i,'EN_DEMAND');
    end
    for i=1:Num_links
        F_FUGA(i,tiempo+1)=matlabENgetlinkvalue(i,'EN_FLOW');
    end
    tstep=matlabENnextH(); %establece el siguiente tiempo de acuerdo a la
sig cuenta de epanet
    matlabENsetnodevalue(iif, 'EN_BASEDEMAND',0 );
end

%%RUIDO EN LA MEDICIÓN
%P_FUGA=awgn(P_FUGA,20);

```

```

%cargar MATRICES DE SENSIBILIDAD obtenidas para cad hora del día
load('res_muestra.mat');

%obtener matriz de residuos por hora actuales
RES_FUGA_ACT=P-P_FUGA;
[m,r]=size(RES_FUGA_ACT);

load('res_fugas.mat');
% FINALIZA PARTE COMÚN

disp(['PROCESANDO FUGA EN ',num2str(nf{1})]);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%MÉTODOS DIRECTOS:%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               AISLAMIENTO DE FUGA UTILIZANDO MATRIZ BINARIZADA                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Binarización de las matrices de sensibilidad
for j=1:tiempo+1
    for i=1:length(nodos_de_red)
        for k=1:length(nodos_de_red)
            if
RES_MUESTRA(j).value(i,k)>max(RES_MUESTRA(j).value(:,k))*0.95
                RES_MUESTRA_BIN(j).value(i,k)=1;
            else
                RES_MUESTRA_BIN(j).value(i,k)=0;
            end
        end
    end
end

for i=1:length(nodos_de_red)
    for k=1:tiempo+1
        if RES_FUGA_ACT(i,k)>max(RES_FUGA_ACT(:,k))*0.95
            RES_FUGA_ACT_BIN(i,k)=1;
        else
            RES_FUGA_ACT_BIN(i,k)=0;
        end
    end
end

%comparar vectores de fugas de cada hora con las matrices de posibles
fugas
%de cada hora y elegir el indice del que sea igual como fuga

for i=1:tiempo+1
    for j=1:length(nodos_de_red)
        if RES_FUGA_ACT_BIN(:,i)==RES_MUESTRA_BIN(i).value(:,j)
            nodo_fuga_b(j,i)=1;
        else
            nodo_fuga_b(j,i)=0;
        end
    end
end

```



```

    end
end

for i=1:length(nodos_de_red)
    tot_bin(i)=sum(nodo_fuga_b(i,:));
end

for i=1:length(nodos_de_red)
    if tot_bin(i)==max(tot_bin)
        fugueta(i)=1;
    else
        fugueta(i)=0;
    end
end

%encontrar el indice del nodo en el que se presenta la fuga

%%%tomando en cuenta horizonte de 24 horas
indice_fuga_bin=find(fugueta);
indice_fuga_bin=indice_fuga_bin(1);
nodo_en_fuga_bin=matlabENgetnodeid(indice_fuga_bin);

%%%tamaño de la fuga
for i=1:tiempo+1

tamaño_f(i,1)=RES_FUGA_ACT(indice_fuga_bin,i)/res_fugas(indice_fuga_bin).
value(indice_fuga_bin,i);
end

tamaño_fuga_bin2=mean(tamaño_f);

disp(' ');
disp('RESULTADOS MÉTODO DE MATRIZ BINARIZADA');
disp(['Fuga en el indice ',num2str(indice_fuga_bin),' que corresponde al
nodo ',num2str(nodo_en_fuga_bin),' con magnitud aproximada de
',num2str(tamaño_fuga_bin2),' lps.']);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
*           AISLAMIENTO DE FUGA UTILIZANDO CORRELACIÓN DE DATOS           *
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%considerando el horizonte de tiempo con fuga constante
%
for j=1:length(nodos_de_red)
    for i=1:r
        CORR2(i,j)=corr(RES_FUGA_ACT(:,j),RES_MUESTRA(i).value(:,j));
    end
end

CORR2_S=sum(CORR2);

for i=1:length(nodos_de_red)
    if CORR2_S(i)==max(CORR2_S)

```

```

        CORR2_SI(i)=1;
    else
        CORR2_SI(i)=0;
    end
end

indice_fuga_co=find(CORR2_SI);
si_in=size(indice_fuga_co);
if si_in(2)~=0
    nodo_en_fuga_co=matlabENgetnodeid(indice_fuga_co);

for i=1:tiempo+1

tamano_fc(i,1)=RES_FUGA_ACT(indice_fuga_co,i)/res_fugas(indice_fuga_co).v
aloe(indice_fuga_co,i);
end

tamano_fuga_co2=mean(tamano_fc);
else
    indice_fuga_co=0;
    tamano_fuga_co2=0;
end

disp(' ');
disp('RESULTADOS MÉTODO DE CORRELACIÓN');
disp(['Fuga en el indice ',num2str(indice_fuga_co),' que corresponde al
nodo ',num2str(nodo_en_fuga_co),' con magnitud aproximada de
',num2str(tamano_fuga_co2),' lps.']);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%           AISLAMIENTO DE FUGA UTILIZANDO DISTANCIA EUCLIDIANA           %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

RES_FUGA_ACT_D=(P-P_FUGA)/50;
%%%REQUIERE QUE LOS RESIDUOS ACTUALES TAMBIEN SEAN AISLADOS DEL TAMAÑO DE
%%%FUGA CON EL QUE SE OBTUVIERON LAS MATRICES DE SENSIBILIDAD

%aplicación de medidas de distancia euclidiana
for j=1:r
    for i=1:length(nodos_de_red)

DIST_EUCL(i,j)=distancia(RES_FUGA_ACT_D(:,j),RES_MUESTRA(j).value(:,i));
end
end

for i=1:length(nodos_de_red)
    suma_dist(i)=sum(DIST_EUCL(i,:));
end

for i=1:length(nodos_de_red)
    if suma_dist(i)==min(suma_dist)
        dist_tot(i)=1;
    else
        dist_tot(i)=0;
    end
end

```

```

end

indice_fuga_dist=find(dist_tot);
nodo_en_fuga_dist=matlabENgetnodeid(indice_fuga_dist);

for i=1:tiempo+1

tamano_FD(i,1)=RES_FUGA_ACT(indice_fuga_dist,i)/res_fugas(indice_fuga_dist).value(indice_fuga_dist,i);
end

tamano_fuga_dist2=mean(tamano_FD);

disp(' ');
disp('RESULTADOS MÉTODO DE DISTANCIA EUCLIDIANA');
disp(['Fuga en el índice ',num2str(indice_fuga_dist),' que corresponde al
nodo ',num2str(nodo_en_fuga_dist),' con magnitud aproximada de
',num2str(tamano_fuga_dist2),' lps.']);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% AISLAMIENTO DE FUGA UTILIZANDO ÁNGULO ENTRE VECTORES %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%aplicación de medidas de ÁNGULO entre vectores
for j=1:r
    for i=1:length(nodos_de_red)
        ANG_VEC(i,j)=ÁNGULO(RES_FUGA_ACT(:,j),RES_MUESTRA(j).value(:,i));
    end
end

%elección del nodo con el menor ÁNGULO entre vectores
for j=1:r
    for i=1:length(nodos_de_red)
        if ANG_VEC(i,j)==min(abs(ANG_VEC(:,j))) && min(ANG_VEC(:,j))<1
            f_a(i,j)=1;
        else
            f_a(i,j)=0;
        end
    end
end

%%encontrar el ÁNGULO medio entre los vectores durante las 24 horas
for i=1:m
    ang_med(i)=mean(abs(ANG_VEC(i,:)));
end

for i=1:length(nodos_de_red)
    if ang_med(i)==min(ang_med)
        ang_tot(i)=1;
    else
        ang_tot(i)=0;
    end
end

indice_fuga_ang=find(ang_tot);

```

```

nodo_en_fuga_ang=matlabENgetnodeid(indice_fuga_ang);

for i=1:tiempo+1

tamano_fA(i,1)=RES_FUGA_ACT(indice_fuga_ang,i)/res_fugas(indice_fuga_ang)
.value(indice_fuga_ang,i);
end

tamano_fuga_ang2=mean(tamano_fA);

disp(' ');
disp('RESULTADOS MÉTODO DE ÁNGULO ENTRE VECTORES');
disp(['Fuga en el indice ',num2str(indice_fuga_ang),' que corresponde al
nodo ',num2str(nodo_en_fuga_ang),' con magnitud aproximada de
',num2str(tamano_fuga_ang2),' lps.']);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%MÉTODO INDIRECTO:%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% AISLAMIENTO UTILIZANDO OPTIMIZACIÓN POR MINIMOS CUADRADOS %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

global RES_FUGA_ACT2 res_nodos;

RES_FUGA_ACT2=P-P_FUGA;

for i=1:31
res_nodos=res_fugas(i).value;

% This is an auto generated M-file from Optimization Tool.

% Start with the default options
options = optimset;
% Modify options setting
options = optimset(options,'Display','off');
options = optimset(options,'Algorithm','active-set');
[tam_fuga(i),error_fuga(i),exitflag,output,lambda,grad,hessian] = ...
fmincon(@funcione,0,[],[],0,0,0,200,[],options);

end

for i=1:31
if error_fuga(i)==min(error_fuga)&& min(error_fuga)>0
bin(i)=1;
else
bin(i)=0;
end
end

indice_fuga=find(bin);
indice_fuga=indice_fuga(1);
tamano_fuga=tam_fuga(indice_fuga);

```

```

for i=1:length(indice_fuga)
nodo_fuga=matlabENgetnodeid(indice_fuga(i));
end

disp(' ');
disp('RESULTADOS MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN POR MINIMOS CUADRADOS');
for i=1:length(indice_fuga)
disp(['Fuga en el índice ',num2str(indice_fuga(i)),' que corresponde al
nodo ',num2str(nodo_fuga),' de magnitud aproximada de
',num2str(tamano_fuga(i)),' lps que considera constante durante las 24
horas.']);
end

MÉTODO_binarizacion(ka,:)=[indice_fuga_bin tamano_fuga_bin2];
MÉTODO_correlacion(ka,:)=[indice_fuga_co tamano_fuga_co2];
MÉTODO_distancia(ka,:)=[indice_fuga_dist tamano_fuga_dist2];
MÉTODO_ÁNGULO(ka,:)=[indice_fuga_ang tamano_fuga_ang2];
MÉTODO_optim(ka,:)=[indice_fuga tamano_fuga];

% for i=1:5
%     indices(ka).MÉTODOS.indice(i)=indices_fugas(ka,i);
%     indices(ka).MÉTODOS.magnitud(i)=magnitudes_fugas(ka,i);
% end
% clc
% end

save resultados_binarización.mat MÉTODO_binarizacion
save resultados_correlación.mat MÉTODO_correlacion
save resultados_distancia.mat MÉTODO_distancia
save resultados_ÁNGULO.mat MÉTODO_ÁNGULO
save resultados_optimización.mat MÉTODO_optim

matlabENcloseH();
matlabENclose();
unloadlibrary('epanet2');

```

APÉNDICE C

TABLAS DE RESULTADOS PARA CADA PRUEBA
DE DETECCIÓN DE FUGA EN CADA NODO DE
LA RED DE HANOI

Resultados de pruebas aplicadas a Hanoi
Tabla de resultados obtenida de la aplicación de una fuga de 50 lps en cada uno de los nodos

<i>Fuga en cada nodo con magnitud de 50lps</i>															
<i>Índice con fuga</i>	<i>Método de binarización</i>			<i>Método correlación</i>			<i>Método distancia</i>			<i>Método ángulo</i>			<i>Método optimización</i>		
	<i>Índice detectado</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud*</i>	<i>Índice detectado</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud*</i>	<i>Índice detectado</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud*</i>	<i>Índice detectado</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud*</i>	<i>Índice detectado</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud*</i>
1	1	50.00	1	1	50.00	1	1	50.00	1	1	50.00	1	1	50.00	1
2	2	50.00	1	2	50.00	1	2	50.00	1	2	50.00	1	2	50.00	1
3	3	50.00	1	3	50.00	1	3	50.00	1	3	50.00	1	3	50.00	1
4	4	50.00	1	4	50.00	1	4	50.00	1	4	50.00	1	4	50.00	1
5	5	50.00	1	5	50.00	1	5	50.00	1	5	50.00	1	5	50.00	1
6	6	50.00	1	6	50.00	1	6	50.00	1	6	50.00	1	6	50.00	1
7	7	50.00	1	7	50.00	1	7	50.00	1	7	50.00	1	7	50.00	1
8	8	50.00	1	8	50.00	1	8	50.00	1	8	50.00	1	8	50.00	1
9	9	50.00	1	9	50.00	1	9	50.00	1	9	50.00	1	9	50.00	1
10	10	50.00	1	10	50.00	1	10	50.00	1	10	50.00	1	10	50.00	1
11	11	50.00	1	11	50.00	1	11	50.00	1	11	50.00	1	11	50.00	1
12	12	50.00	1	12	50.00	1	12	50.00	1	12	50.00	1	12	50.00	1
13	13	50.00	1	13	50.00	1	13	50.00	1	13	50.00	1	13	50.00	1
14	14	50.00	1	14	50.00	1	14	50.00	1	14	50.00	1	14	50.00	1
15	15	50.00	1	15	50.00	1	15	50.00	1	15	50.00	1	15	50.00	1
16	16	50.00	1	16	50.00	1	16	50.00	1	16	50.00	1	16	50.00	1
17	17	50.00	1	17	50.00	1	17	50.00	1	17	50.00	1	17	50.00	1
18	18	50.00	1	18	50.00	1	18	50.00	1	18	50.00	1	18	50.00	1
19	19	50.00	1	19	50.00	1	19	50.00	1	19	50.00	1	19	50.00	1
20	20	50.00	1	20	50.00	1	20	50.00	1	20	50.00	1	20	50.00	1
21	21	50.00	1	21	50.00	1	21	50.00	1	21	50.00	1	21	50.00	1
22	22	50.00	1	22	50.00	1	22	50.00	1	22	50.00	1	22	50.00	1
23	23	50.00	1	23	50.00	1	23	50.00	1	23	50.00	1	23	50.00	1
24	24	50.00	1	24	50.00	1	24	50.00	1	24	50.00	1	24	50.00	1
25	25	50.00	1	25	50.00	1	25	50.00	1	25	50.00	1	25	50.00	1
26	26	50.00	1	26	50.00	1	26	50.00	1	26	50.00	1	26	50.00	1
27	27	50.00	1	27	50.00	1	27	50.00	1	27	50.00	1	27	50.00	1
28	28	50.00	1	28	50.00	1	28	50.00	1	28	50.00	1	28	50.00	1
29	29	50.00	1	29	50.00	1	29	50.00	1	29	50.00	1	29	50.00	1
30	30	50.00	1	30	50.00	1	30	50.00	1	30	50.00	1	30	50.00	1
31	31	50.00	1	31	50.00	1	31	50.00	1	31	50.00	1	31	50.00	1
Eficiencia			100			100			100			100			100

Tabla A. 1 Resultados en Hanoi para cada nodo en una fuga de 50 lps

Tabla de resultados obtenidos después de la aplicación de una fuga de 1lps en cada uno de los nodos

Fuga en cada nodo con magnitud de 1 lps															
Índice con fuga	Método de binarización			Método correlación			Método distancia			Método ángulo			Método optimización		
	Índice detectado	Magnitud	Exactitud*	Índice detectado	Magnitud	Exactitud*	Índice detectado	Magnitud	Exactitud*	Índice detectado	Magnitud	Exactitud*	Índice detectado	Magnitud	Exactitud*
1	1	1.00	1	0	0.00	0	1	1.00	1	1	1.00	1	1	0.99	1
2	2	0.99	1	2	0.99	1	1	1.00	0	2	0.99	1	2	0.99	1
3	3	0.99	1	3	0.99	1	1	1.00	0	3	0.99	1	3	0.99	1
4	4	0.99	1	4	0.99	1	1	1.00	0	4	0.99	1	4	0.99	1
5	5	0.99	1	5	0.99	1	1	1.00	0	5	0.99	1	5	0.99	1
6	6	0.99	1	6	0.99	1	1	1.00	0	6	0.99	1	6	0.99	1
7	7	0.99	1	7	0.99	1	1	1.00	0	7	0.99	1	7	0.99	1
8	8	0.98	1	8	0.98	1	1	1.00	0	8	0.98	1	8	0.99	1
9	9	0.98	1	9	0.98	1	1	1.00	0	9	0.98	1	9	0.99	1
10	10	0.98	1	10	0.98	1	1	1.00	0	10	0.98	1	10	0.98	1
11	11	0.95	1	11	0.95	1	1	1.00	0	11	0.95	1	11	0.98	1
12	12	0.92	1	12	0.92	1	1	1.00	0	12	0.92	1	12	0.96	1
13	13	0.97	1	13	0.97	1	1	1.00	0	13	0.97	1	13	0.98	1
14	14	1.04	1	14	1.04	1	1	1.00	0	14	1.04	1	14	0.96	1
15	15	0.98	1	15	0.98	1	1	1.00	0	15	0.98	1	15	0.96	1
16	16	1.00	1	16	1.00	1	1	1.00	0	16	1.00	1	16	0.97	1
17	17	0.97	1	17	0.97	1	1	1.00	0	17	0.97	1	17	0.98	1
18	18	0.97	1	18	0.97	1	1	1.00	0	18	0.97	1	18	0.99	1
19	19	0.99	1	19	0.99	1	1	1.00	0	19	0.99	1	19	0.99	1
20	20	0.93	1	20	0.93	1	1	1.00	0	20	0.93	1	20	0.96	1
21	21	0.83	1	21	0.83	1	1	1.00	0	21	0.83	1	21	0.88	1
22	22	0.98	1	22	0.98	1	1	1.00	0	22	0.98	1	22	0.99	1
23	23	0.98	1	23	0.98	1	1	1.00	0	23	0.98	1	23	0.98	1
24	24	0.98	1	24	0.98	1	1	1.00	0	24	0.98	1	24	0.98	1
25	25	0.95	1	25	0.95	1	1	1.00	0	25	0.95	1	25	0.97	1
26	26	0.88	1	26	0.88	1	1	1.00	0	26	0.88	1	26	0.96	1
27	27	0.90	1	27	0.90	1	1	1.00	0	27	0.90	1	27	0.94	1
28	28	0.74	1	28	0.74	1	1	1.00	0	28	0.74	1	28	0.88	1
29	29	0.91	1	29	0.91	1	1	1.00	0	29	0.91	1	29	0.95	1
30	30	0.94	1	30	0.94	1	1	1.00	0	30	0.94	1	30	0.96	1
31	31	0.96	1	31	0.96	1	1	1.00	0	31	0.96	1	31	0.97	1
Eficiencia			100.00			96.77			3.23			100.00			100.00

Tabla A. 2 Resultados en Hanoi para cada nodo en una fuga de 1 lps

Tabla de resultados obtenidos después de la aplicación de una fuga de 10lps en cada uno de los nodos

Fuga en cada nodo con magnitud de 10 lps															
Índice con fuga	Método de binarización			Método correlación			Método distancia			Método ángulo			Método optimización		
	Índice detectado	Magnitud	Exactitud*	Índice detectado	Magnitud	Exactitud*	Índice detectado	Magnitud	Exactitud*	Índice detectado	Magnitud	Exactitud*	Índice detectado	Magnitud	Exactitud*
1	1	9.93	1	0	0.00	0	1	9.93	1	1	9.93	1	1	9.94	1
2	2	9.93	1	2	9.93	1	1	9.93	0	2	9.93	1	2	9.94	1
3	3	9.91	1	3	9.91	1	1	9.93	0	3	9.91	1	3	9.93	1
4	4	9.90	1	4	9.90	1	1	9.93	0	4	9.90	1	4	9.92	1
5	5	9.89	1	5	9.89	1	1	9.93	0	5	9.89	1	5	9.91	1
6	6	9.89	1	6	9.89	1	1	9.93	0	6	9.89	1	6	9.90	1
7	7	9.88	1	7	9.88	1	1	9.93	0	7	9.88	1	7	9.90	1
8	8	9.88	1	8	9.88	1	1	9.93	0	8	9.88	1	8	9.89	1
9	9	9.87	1	9	9.87	1	1	9.93	0	9	9.87	1	9	9.89	1
10	10	9.80	1	10	9.80	1	1	9.93	0	10	9.80	1	10	9.87	1
11	11	9.63	1	11	9.63	1	1	9.93	0	11	9.63	1	11	9.81	1
12	12	9.32	1	12	9.32	1	1	9.93	0	12	9.32	1	12	9.67	1
13	13	9.74	1	13	9.74	1	1	9.93	0	13	9.74	1	13	9.84	1
14	14	10.34	1	14	10.34	1	1	9.93	0	14	10.34	1	14	9.71	1
15	15	9.79	1	15	9.79	1	1	9.93	0	15	9.79	1	15	9.70	1
16	16	10.01	1	16	10.01	1	1	9.93	0	16	10.01	1	16	9.75	1
17	17	9.76	1	17	9.76	1	1	9.93	0	17	9.76	1	17	9.80	1
18	18	9.78	1	18	9.78	1	1	9.93	0	18	9.78	1	18	9.90	1
19	19	9.89	1	19	9.89	1	1	9.93	0	19	9.89	1	19	9.91	1
20	20	9.40	1	20	9.40	1	1	9.93	0	20	9.40	1	20	9.65	1
21	21	8.61	1	21	8.61	1	1	9.93	0	21	8.61	1	21	9.00	1
22	22	9.87	1	22	9.87	1	1	9.93	0	22	9.87	1	22	9.89	1
23	23	9.83	1	23	9.83	1	1	9.93	0	23	9.83	1	23	9.86	1
24	24	9.80	1	24	9.80	1	1	9.93	0	24	9.80	1	24	9.83	1
25	25	9.62	1	25	9.62	1	1	9.93	0	25	9.62	1	25	9.78	1
26	26	9.05	1	26	9.05	1	1	9.93	0	26	9.05	1	26	9.67	1
27	27	9.17	1	27	9.17	1	1	9.93	0	27	9.17	1	27	9.48	1
28	28	7.96	1	28	7.96	1	1	9.93	0	28	7.96	1	28	9.06	1
29	29	9.27	1	29	9.27	1	1	9.93	0	29	9.27	1	29	9.56	1
30	30	9.49	1	30	9.49	1	1	9.93	0	30	9.49	1	30	9.69	1
31	31	9.69	1	31	9.69	1	1	9.93	0	31	9.69	1	31	9.78	1
Eficiencia			100.00			96.77			3.23			100.00			100.00

Tabla A. 3 Resultados en Hanoi para cada nodo en una fuga de 10lps

Tabla de resultados obtenidos después de la aplicación de una fuga de 20lps en cada uno de los nodos

Índice con fuga	Método de binarización		Exactitud*	Método correlación		Exactitud*	Método distancia			Método ángulo			Método optimización		
	Índice detectado	Magnitud		Índice detectado	Magnitud		Exactitud*	Índice detectado	Magnitud	Exactitud*	Índice detectado	Magnitud	Exactitud*	Índice detectado	Magnitud
1	1	19.90	1	1	19.90	1	1	19.90	1	1	19.90	1	1	19.91	1
2	2	19.89	1	2	19.89	1	1	19.90	0	2	19.89	1	2	19.91	1
3	3	19.86	1	3	19.86	1	1	19.90	0	3	19.86	1	3	19.89	1
4	4	19.84	1	4	19.84	1	1	19.90	0	4	19.84	1	4	19.87	1
5	5	19.83	1	5	19.83	1	2	19.89	0	5	19.83	1	5	19.86	1
6	6	19.83	1	6	19.83	1	2	19.89	0	6	19.83	1	6	19.85	1
7	7	19.82	1	7	19.82	1	2	19.89	0	7	19.82	1	7	19.85	1
8	8	19.82	1	8	19.82	1	2	19.89	0	8	19.82	1	8	19.84	1
9	9	19.81	1	9	19.81	1	2	19.89	0	9	19.81	1	9	19.83	1
10	10	19.71	1	10	19.71	1	2	19.89	0	10	19.71	1	10	19.80	1
11	11	19.44	1	11	19.44	1	2	19.89	0	11	19.44	1	11	19.71	1
12	12	18.98	1	12	18.98	1	2	19.89	0	12	18.98	1	12	19.51	1
13	13	19.62	1	13	19.62	1	2	19.89	0	13	19.62	1	13	19.76	1
14	14	20.55	1	14	20.55	1	2	19.89	0	14	20.55	1	14	19.57	1
15	15	19.57	1	15	19.57	1	2	19.89	0	15	19.57	1	15	19.55	1
16	16	20.09	1	16	20.09	1	2	19.89	0	16	20.09	1	16	19.64	1
17	17	19.64	1	17	19.64	1	2	19.89	0	17	19.64	1	17	19.70	1
18	18	19.67	1	18	19.67	1	1	19.90	0	18	19.67	1	18	19.85	1
19	19	19.84	1	19	19.84	1	1	19.90	0	19	19.84	1	19	19.87	1
20	20	19.10	1	20	19.10	1	2	19.89	0	20	19.10	1	20	19.48	1
21	21	17.92	1	21	17.92	1	2	19.89	0	21	17.92	1	21	18.51	1
22	22	19.80	1	22	19.80	1	2	19.89	0	22	19.80	1	22	19.83	1
23	23	19.74	1	23	19.74	1	2	19.89	0	23	19.74	1	23	19.79	1
24	24	19.70	1	24	19.70	1	2	19.89	0	24	19.70	1	24	19.75	1
25	25	19.43	1	25	19.43	1	2	19.89	0	25	19.43	1	25	19.67	1
26	26	18.58	1	26	18.58	1	2	19.89	0	26	18.58	1	26	19.51	1
27	27	18.77	1	27	18.77	1	2	19.89	0	27	18.77	1	27	19.23	1
28	28	17.04	1	28	17.04	1	2	19.89	0	28	17.04	1	28	18.62	1
29	29	18.92	1	29	18.92	1	2	19.89	0	29	18.92	1	29	19.34	1
30	30	19.24	1	30	19.24	1	2	19.89	0	30	19.24	1	30	19.53	1
31	31	19.54	1	31	19.54	1	2	19.89	0	31	19.54	1	31	19.68	1
Eficiencia			100.00			100.00			3.23			100.00			100.00

Tabla A. 4 Resultados en Hanoi para cada nodo en una fuga de 20lps

Tabla de resultados obtenidos después de la aplicación de una fuga de 30lps en cada uno de los nodos

<i>fuga en cada nodo con magnitud de 30 lps</i>															
<i>índice con fuga</i>	<i>método de binarización</i>			<i>método correlación</i>			<i>método distancia</i>			<i>método ángulo</i>			<i>método optimización</i>		
	<i>Índice detectado</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud*</i>	<i>Índice detectado</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud*</i>	<i>Índice detectado</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud*</i>	<i>Índice detectado</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud*</i>	<i>Índice detectado</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud*</i>
1	1	29.90	1	1	29.90	1	1	29.90	1	1	29.90	1	1	29.91	1
2	2	29.89	1	2	29.89	1	2	29.89	1	2	29.89	1	2	29.91	1
3	3	29.86	1	3	29.86	1	2	29.89	0	3	29.86	1	3	29.89	1
4	4	29.84	1	4	29.84	1	2	29.89	0	4	29.84	1	4	29.87	1
5	5	29.83	1	5	29.83	1	2	29.89	0	5	29.83	1	5	29.86	1
6	6	29.83	1	6	29.83	1	2	29.89	0	6	29.83	1	6	29.85	1
7	7	29.82	1	7	29.82	1	3	29.47	0	7	29.82	1	7	29.85	1
8	8	29.82	1	8	29.82	1	3	29.41	0	8	29.82	1	8	29.84	1
9	9	29.81	1	9	29.81	1	3	29.36	0	9	29.81	1	9	29.83	1
10	10	29.71	1	10	29.71	1	3	29.36	0	10	29.71	1	10	29.80	1
11	11	29.44	1	11	29.44	1	4	29.18	0	11	29.44	1	11	29.71	1
12	12	28.99	1	12	28.99	1	4	29.18	0	12	28.99	1	12	29.51	1
13	13	29.63	1	13	29.63	1	3	28.78	0	13	29.63	1	13	29.76	1
14	14	30.50	1	14	30.50	1	3	26.41	0	14	30.50	1	14	29.57	1
15	15	29.30	1	15	29.30	1	19	24.01	0	15	29.30	1	15	29.56	1
16	16	30.17	1	16	30.17	1	18	26.88	0	16	30.17	1	16	29.65	1
17	17	29.65	1	17	29.65	1	18	28.39	0	17	29.65	1	17	29.70	1
18	18	29.67	1	18	29.67	1	2	29.89	0	18	29.67	1	18	29.85	1
19	19	29.84	1	19	29.84	1	2	29.89	0	19	29.84	1	19	29.87	1
20	20	29.11	1	20	29.11	1	2	29.89	0	20	29.11	1	20	29.48	1
21	21	27.93	1	21	27.93	1	20	29.11	0	21	27.93	1	21	28.52	1
22	22	29.80	1	22	29.80	1	2	29.89	0	22	29.80	1	22	29.83	1
23	23	29.74	1	23	29.74	1	19	28.80	0	23	29.74	1	23	29.79	1
24	24	29.70	1	24	29.70	1	19	28.32	0	24	29.70	1	24	29.75	1
25	25	29.44	1	25	29.44	1	19	27.14	0	25	29.44	1	25	29.67	1
26	26	28.59	1	26	28.59	1	19	25.66	0	26	28.59	1	26	29.51	1
27	27	28.80	1	27	28.80	1	19	29.18	0	27	28.80	1	27	29.23	1
28	28	27.12	1	28	27.12	1	22	28.77	0	28	27.12	1	28	28.65	1
29	29	28.93	1	29	28.93	1	22	28.51	0	29	28.93	1	29	29.34	1
30	30	29.25	1	30	29.25	1	22	28.41	0	30	29.25	1	30	29.53	1
31	31	29.55	1	31	29.55	1	22	28.35	0	31	29.55	1	31	29.68	1
Eficiencia			100.00			100.00			6.45			100.00			100.00

Tabla A. 5 Resultados en Hanoi para cada nodo en una fuga de 30lps

Tabla de resultados obtenidos después de la aplicación de una fuga de 40lps en cada uno de los nodos

Fuga en cada nodo con magnitud de 40 lps															
Índice con fuga	Método de binarización			Método correlación			Método distancia			Método ángulo			Método optimización		
	Índice detectado	Magnitud	Exactitud*	Índice detectado	Magnitud	Exactitud*	Índice detectado	Magnitud	Exactitud*	Índice detectado	Magnitud	Exactitud*	Índice detectado	Magnitud	Exactitud*
1	1	39.93	1	1	39.93	1	1	39.93	1	1	39.93	1	1	39.94	1
2	2	39.93	1	2	39.93	1	2	39.93	1	2	39.93	1	2	39.94	1
3	3	39.91	1	3	39.91	1	2	39.93	0	3	39.91	1	3	39.93	1
4	4	39.90	1	4	39.90	1	3	39.73	0	4	39.90	1	4	39.92	1
5	5	39.89	1	5	39.89	1	4	39.52	0	5	39.89	1	5	39.91	1
6	6	39.89	1	6	39.89	1	4	39.42	0	6	39.89	1	6	39.90	1
7	7	39.88	1	7	39.88	1	4	39.26	0	7	39.88	1	7	39.90	1
8	8	39.88	1	8	39.88	1	4	39.12	0	8	39.88	1	8	39.89	1
9	9	39.87	1	9	39.87	1	5	39.19	0	9	39.87	1	9	39.89	1
10	10	39.81	1	10	39.81	1	5	39.19	0	10	39.81	1	10	39.87	1
11	11	39.63	1	11	39.63	1	10	39.81	0	11	39.63	1	11	39.81	1
12	12	39.33	1	12	39.33	1	11	39.63	0	12	39.33	1	12	39.68	1
13	13	39.76	1	13	39.76	1	5	37.27	0	13	39.76	1	13	39.84	1
14	14	40.18	1	14	40.18	1	14	40.18	1	14	40.18	1	14	39.71	1
15	15	39.37	1	15	39.37	1	15	39.37	1	15	39.37	1	15	39.69	1
16	16	40.19	1	16	40.19	1	17	34.81	0	16	40.19	1	16	39.77	1
17	17	39.78	1	17	39.78	1	17	39.78	1	17	39.78	1	17	39.80	1
18	18	39.78	1	18	39.78	1	2	39.93	0	18	39.78	1	18	39.90	1
19	19	39.89	1	19	39.89	1	2	39.93	0	19	39.89	1	19	39.91	1
20	20	39.41	1	20	39.41	1	20	39.41	1	20	39.41	1	20	39.65	1
21	21	38.63	1	21	38.63	1	21	38.63	1	21	38.63	1	21	39.02	1
22	22	39.87	1	22	39.87	1	19	39.28	0	22	39.87	1	22	39.89	1
23	23	39.83	1	23	39.83	1	22	38.77	0	23	39.83	1	23	39.86	1
24	24	39.80	1	24	39.80	1	23	38.41	0	24	39.80	1	24	39.83	1
25	25	39.63	1	25	39.63	1	23	35.68	0	25	39.63	1	25	39.78	1
26	26	39.07	1	26	39.07	1	26	39.07	1	26	39.07	1	26	39.68	1
27	27	39.21	1	27	39.21	1	27	39.21	1	27	39.21	1	27	39.49	1
28	28	38.12	1	28	38.12	1	28	38.12	1	28	38.12	1	28	39.11	1
29	29	39.28	1	29	39.28	1	30	37.69	0	29	39.28	1	29	39.56	1
30	30	39.51	1	30	39.51	1	31	38.92	0	30	39.51	1	30	39.69	1
31	31	39.70	1	31	39.70	1	23	38.11	0	31	39.70	1	31	39.78	1
Eficiencia			100.00			100.00			32.26			100.00			100.00

Tabla A. 6 Resultados en Hanoi para cada nodo en una fuga de 40lps

Tabla de resultados obtenidos después de la aplicación de una fuga de 60lps en cada uno de los nodos

<i>Fuga en cada nodo con magnitud de 60 lps</i>															
<i>Índice con fuga</i>	<i>Método de binarización</i>			<i>Método correlación</i>			<i>Método distancia</i>			<i>Método ángulo</i>			<i>Método optimización</i>		
	<i>Índice detectado</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud*</i>	<i>Índice detectado</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud*</i>	<i>Índice detectado</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud*</i>	<i>Índice detectado</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud*</i>	<i>Índice detectado</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud*</i>
1	1	60.10	1	1	60.10	1	1	60.10	1	1	60.10	1	1	60.09	1
2	2	60.11	1	2	60.11	1	3	46.76	0	2	60.11	1	2	60.09	1
3	3	60.14	1	3	60.14	1	4	47.17	0	3	60.14	1	3	60.11	1
4	4	60.16	1	4	60.16	1	5	48.31	0	4	60.16	1	4	60.13	1
5	5	60.17	1	5	60.17	1	8	50.01	0	5	60.17	1	5	60.14	1
6	6	60.17	1	6	60.17	1	9	50.01	0	6	60.17	1	6	60.15	1
7	7	60.18	1	7	60.18	1	9	53.77	0	7	60.18	1	7	60.15	1
8	8	60.18	1	8	60.18	1	10	48.87	0	8	60.18	1	8	60.16	1
9	9	60.19	1	9	60.19	1	10	51.48	0	9	60.19	1	9	60.17	1
10	10	60.29	1	10	60.29	1	10	60.29	1	10	60.29	1	10	60.19	1
11	11	60.55	1	11	60.55	1	11	60.55	1	11	60.55	1	11	60.29	1
12	12	61.00	1	12	61.00	1	12	61.00	1	12	61.00	1	12	60.48	1
13	13	60.33	1	13	60.33	1	13	60.33	1	13	60.33	1	13	60.23	1
14	14	60.33	1	14	60.33	1	14	60.33	1	14	60.33	1	14	60.41	1
15	15	61.24	1	15	61.24	1	15	61.24	1	15	61.24	1	15	60.49	1
16	16	59.43	1	16	59.43	1	16	59.43	1	16	59.43	1	16	60.33	1
17	17	60.31	1	17	60.31	1	17	60.31	1	17	60.31	1	17	60.29	1
18	18	60.33	1	18	60.33	1	18	60.33	1	18	60.33	1	18	60.15	1
19	19	60.16	1	19	60.16	1	22	44.92	0	19	60.16	1	19	60.13	1
20	20	60.89	1	20	60.89	1	20	60.89	1	20	60.89	1	20	60.52	1
21	21	62.04	1	21	62.04	1	21	62.04	1	21	62.04	1	21	61.46	1
22	22	60.20	1	22	60.20	1	23	45.26	0	22	60.20	1	22	60.17	1
23	23	60.26	1	23	60.26	1	24	50.17	0	23	60.26	1	23	60.21	1
24	24	60.30	1	24	60.30	1	31	48.18	0	24	60.30	1	24	60.25	1
25	25	60.56	1	25	60.56	1	25	60.56	1	25	60.56	1	25	60.33	1
26	26	61.39	1	26	61.39	1	26	61.39	1	26	61.39	1	26	60.48	1
27	27	61.14	1	27	61.14	1	27	61.14	1	27	61.14	1	27	60.76	1
28	28	62.72	1	28	62.72	1	28	62.72	1	28	62.72	1	28	61.30	1
29	29	61.11	1	29	61.11	1	29	61.11	1	29	61.11	1	29	60.64	1
30	30	60.73	1	30	60.73	1	29	45.67	0	30	60.73	1	30	60.46	1
31	31	60.45	1	31	60.45	1	30	49.50	0	31	60.45	1	31	60.32	1
Eficiencia			100.00			100.00			54.84			100.00			100.00

Tabla A. 7 Resultados en Hanoi para cada nodo en una fuga de 60lps

Tabla de resultados obtenidos después de la aplicación de una fuga de 70lps en cada uno de los nodos

<i>Fuga en cada nodo con magnitud de 70 lps</i>															
<i>Índice con fuga</i>	<i>Método de binarización</i>			<i>Método correlación</i>			<i>Método distancia</i>			<i>Método ángulo</i>			<i>Método optimización</i>		
	<i>Índice detectado</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud*</i>	<i>Índice detectado</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud*</i>	<i>Índice detectado</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud*</i>	<i>Índice detectado</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud*</i>	<i>Índice detectado</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud*</i>
1	1	70.23	1	0	0.00	0	1	70.23	1	1	70.23	1	1	70.22	1
2	2	70.25	1	2	70.25	1	4	43.06	0	2	70.25	1	2	70.22	1
3	3	70.32	1	3	70.32	1	5	44.47	0	3	70.32	1	3	70.26	1
4	4	70.36	1	4	70.36	1	8	47.11	0	4	70.36	1	4	70.30	1
5	5	70.39	1	5	70.39	1	10	47.54	0	5	70.39	1	5	70.33	1
6	6	70.39	1	6	70.39	1	10	50.04	0	6	70.39	1	6	70.34	1
7	7	70.41	1	7	70.41	1	10	53.81	0	7	70.41	1	7	70.36	1
8	8	70.42	1	8	70.42	1	10	57.19	0	8	70.42	1	8	70.38	1
9	9	70.43	1	9	70.43	1	10	60.24	0	9	70.43	1	9	70.39	1
10	10	70.67	1	10	70.67	1	11	49.31	0	10	70.67	1	10	70.45	1
11	11	71.29	1	11	71.29	1	12	43.84	0	11	71.29	1	11	70.67	1
12	12	72.34	1	12	72.34	1	12	72.34	1	12	72.34	1	12	71.13	1
13	13	70.74	1	13	70.74	1	13	70.74	1	13	70.74	1	13	70.54	1
14	14	71.28	1	14	71.28	1	14	71.28	1	14	71.28	1	14	70.96	1
15	15	73.11	1	15	73.11	1	15	73.11	1	15	73.11	1	15	71.14	1
16	16	68.46	1	16	68.46	1	16	68.46	1	16	68.46	1	16	70.73	1
17	17	70.69	1	17	70.69	1	16	43.35	0	17	70.69	1	17	70.69	1
18	18	70.77	1	18	70.77	1	18	70.77	1	18	70.77	1	18	70.36	1
19	19	70.37	1	19	70.37	1	22	52.54	0	19	70.37	1	19	70.31	1
20	20	72.07	1	20	72.07	1	20	72.07	1	20	72.07	1	20	71.20	1
21	21	74.74	1	21	74.74	1	21	74.74	1	21	74.74	1	21	73.39	1
22	22	70.47	1	22	70.47	1	24	44.62	0	22	70.47	1	22	70.39	1
23	23	70.60	1	23	70.60	1	31	47.18	0	23	70.60	1	23	70.49	1
24	24	70.70	1	24	70.70	1	30	46.44	0	24	70.70	1	24	70.58	1
25	25	71.29	1	25	71.29	1	25	71.29	1	25	71.29	1	25	70.76	1
26	26	73.22	1	26	73.22	1	26	73.22	1	26	73.22	1	26	71.12	1
27	27	72.61	1	27	72.61	1	27	72.61	1	27	72.61	1	27	71.78	1
28	28	76.26	1	28	76.26	1	28	76.26	1	28	76.26	1	28	73.01	1
29	29	72.61	1	29	72.61	1	29	72.61	1	29	72.61	1	29	71.46	1
30	30	71.71	1	30	71.71	1	29	53.94	0	30	71.71	1	30	71.08	1
31	31	71.04	1	31	71.04	1	30	58.18	0	31	71.04	1	31	70.75	1
Eficiencia			100.00			96.77			45.16			100.00			100.00

Tabla A. 8 Resultados en Hanoi para cada nodo en una fuga de 70lps

Tabla de resultados obtenidos después de la aplicación de una fuga de 80lps en cada uno de los nodos

Fuga en cada nodo con magnitud de 80 lps															
Índice con fuga	Método de binarización			Método correlación			Método distancia			Método ángulo			Método optimización		
	Índice detectado	Magnitud	Exactitud*	Índice detectado	Magnitud	Exactitud*	Índice detectado	Magnitud	Exactitud*	Índice detectado	Magnitud	Exactitud*	Índice detectado	Magnitud	Exactitud*
1	1	80.40	1	1	80.40	1	1	80.40	1	1	80.40	1	1	80.37	1
2	2	80.42	1	2	80.42	1	19	47.44	0	2	80.42	1	2	80.37	1
3	3	80.55	1	3	80.55	1	7	45.19	0	3	80.55	1	3	80.44	1
4	4	80.62	1	4	80.62	1	9	51.33	0	4	80.62	1	4	80.51	1
5	5	80.66	1	5	80.66	1	10	54.48	0	5	80.66	1	5	80.57	1
6	6	80.67	1	6	80.67	1	10	57.34	0	6	80.67	1	6	80.58	1
7	7	80.70	1	7	80.70	1	11	43.03	0	7	80.70	1	7	80.62	1
8	8	80.72	1	8	80.72	1	11	45.73	0	8	80.72	1	8	80.64	1
9	9	80.73	1	9	80.73	1	11	48.18	0	9	80.73	1	9	80.66	1
10	10	81.15	1	10	81.15	1	11	56.62	0	10	81.15	1	10	80.78	1
11	11	82.20	1	11	82.20	1	12	50.55	0	11	82.20	1	11	81.15	1
12	12	83.99	1	12	83.99	1	12	83.99	1	12	83.99	1	12	81.93	1
13	13	81.21	1	13	81.21	1	13	81.21	1	13	81.21	1	13	80.93	1
14	14	82.88	1	14	82.88	1	14	82.88	1	14	82.88	1	14	81.68	1
15	15	85.58	1	15	85.58	1	15	85.58	1	15	85.58	1	15	81.93	1
16	16	77.55	1	16	77.55	1	16	77.55	1	16	77.55	1	16	81.24	1
17	17	81.12	1	17	81.12	1	16	49.62	0	17	81.12	1	17	81.17	1
18	18	81.32	1	18	81.32	1	19	47.90	0	18	81.32	1	18	80.61	1
19	19	80.63	1	19	80.63	1	23	45.59	0	19	80.63	1	19	80.53	1
20	20	83.53	1	20	83.53	1	20	83.53	1	20	83.53	1	20	82.06	1
21	21	88.09	1	21	88.09	1	21	88.09	1	21	88.09	1	21	85.80	1
22	22	80.80	1	22	80.80	1	24	51.17	0	22	80.80	1	22	80.67	1
23	23	81.03	1	23	81.03	1	31	54.16	0	23	81.03	1	23	80.85	1
24	24	81.20	1	24	81.20	1	30	53.33	0	24	81.20	1	24	80.99	1
25	25	82.21	1	25	82.21	1	26	59.72	0	25	82.21	1	25	81.30	1
26	26	85.49	1	26	85.49	1	26	85.49	1	26	85.49	1	26	81.92	1
27	27	84.39	1	27	84.39	1	27	84.39	1	27	84.39	1	27	83.04	1
28	28	90.61	1	28	90.61	1	28	90.61	1	28	90.61	1	28	85.11	1
29	29	84.52	1	29	84.52	1	29	84.52	1	29	84.52	1	29	82.48	1
30	30	82.93	1	30	82.93	1	29	62.40	0	30	82.93	1	30	81.84	1
31	31	81.78	1	31	81.78	1	29	50.64	0	31	81.78	1	31	81.29	1
Eficiencia			100.00			100.00			38.71			100.00			100.00

Tabla A. 9 Resultados en Hanoi para cada nodo en una fuga de 80lps

Tabla de resultados obtenidos después de la aplicación de una fuga de 90lps en cada uno de los nodos

Fuga en cada nodo con magnitud de 90 lps															
Índice con fuga	Método de binarización			Método correlación			Método distancia			Método ángulo			Método optimización		
	Índice detectado	Magnitud	Exactitud*	Índice detectado	Magnitud	Exactitud*	Índice detectado	Magnitud	Exactitud*	Índice detectado	Magnitud	Exactitud*	Índice detectado	Magnitud	Exactitud*
1	1	90.60	1	1	90.60	1	1	90.60	1	1	90.60	1	1	90.53	1
2	2	90.63	1	2	90.63	1	22	40.53	0	2	90.63	1	2	90.56	1
3	3	90.82	1	3	90.82	1	13	30.75	0	3	90.82	1	3	90.66	1
4	4	90.93	1	4	90.93	1	13	38.31	0	4	90.93	1	4	90.76	1
5	5	90.99	1	5	90.99	1	13	47.01	0	5	90.99	1	5	90.85	1
6	6	91.00	1	6	91.00	1	11	45.13	0	6	91.00	1	6	90.87	1
7	7	91.04	1	7	91.04	1	11	48.54	0	7	91.04	1	7	90.93	1
8	8	91.07	1	8	91.07	1	11	51.60	0	8	91.07	1	8	90.97	1
9	9	91.09	1	9	91.09	1	11	54.37	0	9	91.09	1	9	91.00	1
10	10	91.71	1	10	91.71	1	11	63.99	0	10	91.71	1	10	91.16	1
11	11	93.29	1	11	93.29	1	12	57.37	0	11	93.29	1	11	91.73	1
12	12	95.97	1	12	95.97	1	12	95.97	1	12	95.97	1	12	92.89	1
13	13	91.73	1	13	91.73	1	13	91.73	1	13	91.73	1	13	91.38	1
14	14	95.17	1	14	95.17	1	14	95.17	1	14	95.17	1	14	92.68	1
15	15	98.61	1	15	98.61	1	15	98.61	1	15	98.61	1	15	92.87	1
16	16	87.01	1	16	87.01	1	16	87.01	1	16	87.01	1	16	91.85	1
17	17	91.57	1	17	91.57	1	16	55.87	0	17	91.57	1	17	91.75	1
18	18	91.97	1	18	91.97	1	22	41.26	0	18	91.97	1	18	90.91	1
19	19	90.95	1	19	90.95	1	24	43.59	0	19	90.95	1	19	90.80	1
20	20	95.29	1	20	95.29	1	21	39.33	0	20	95.29	1	20	93.08	1
21	21	102.09	1	21	102.09	1	21	102.09	1	21	102.09	1	21	98.66	1
22	22	91.20	1	22	91.20	1	31	46.76	0	22	91.20	1	22	91.00	1
23	23	91.55	1	23	91.55	1	30	50.54	0	23	91.55	1	23	91.27	1
24	24	91.79	1	24	91.79	1	30	60.29	0	24	91.79	1	24	91.48	1
25	25	93.31	1	25	93.31	1	26	68.12	0	25	93.31	1	25	91.95	1
26	26	98.20	1	26	98.20	1	26	98.20	1	26	98.20	1	26	92.87	1
27	27	96.47	1	27	96.47	1	27	96.47	1	27	96.47	1	27	94.56	1
28	28	105.74	1	28	105.74	1	28	105.74	1	28	105.74	1	28	97.61	1
29	29	96.83	1	29	96.83	1	28	55.55	0	29	96.83	1	29	93.68	1
30	30	94.41	1	30	94.41	1	29	71.07	0	30	94.41	1	30	92.74	1
31	31	92.66	1	31	92.66	1	29	57.39	0	31	92.66	1	31	91.93	1
Eficiencia			100.00			100.00			32.26			100.00			100.00

Tabla A. 10 Resultados en Hanoi para cada nodo en una fuga de 90lps

APENDICE D

TABLAS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS ALEATORIAS APLICADAS A CADA UNA DE LAS REDES

Resultados de pruebas aleatorias aplicadas a la Red de Hanoi

<i>Resultados de pruebas en nodos y magnitudes aleatorias sin ruido</i>																
<i>Prueba</i>	<i>Método Binarización</i>			<i>Método Correlación</i>			<i>Método Distancia</i>			<i>Método Ángulo</i>			<i>Método Optimización</i>			
<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>
5	63.12	5	63.35	1	5	63.35	1	9	50.03	0	5	63.35	1	5	63.32	1
10	33.80	10	33.54	1	10	33.54	1	4	32.91	0	10	33.54	1	10	33.62	1
6	46.58	6	46.54	1	6	46.54	1	5	46.38	0	6	46.54	1	6	46.55	1
10	46.11	10	46.02	1	10	46.02	1	9	46.06	0	10	46.02	1	10	46.05	1
4	48.38	4	48.36	1	4	48.36	1	4	48.36	1	4	48.36	1	4	48.36	1
26	36.65	26	35.51	1	26	35.51	1	22	30.09	0	26	35.51	1	26	36.26	1
31	40.67	31	40.38	1	31	40.38	1	23	38.76	0	31	40.38	1	31	40.47	1
7	40.72	7	40.61	1	7	40.61	1	4	39.97	0	7	40.61	1	7	40.62	1
22	69.20	22	69.64	1	22	69.64	1	24	44.10	0	22	69.64	1	22	69.57	1
2	22.89	2	22.78	1	2	22.78	1	1	22.78	0	2	22.78	1	2	22.79	1
20	39.83	20	39.23	1	20	39.23	1	20	39.23	1	20	39.23	1	20	39.48	1
21	59.57	21	61.50	1	21	61.50	1	21	61.50	1	21	61.50	1	21	60.95	1
2	49.71	2	49.71	1	2	49.71	1	2	49.71	1	2	49.71	1	2	49.71	1
1	35.48	1	35.39	1	10	0.86	0	1	35.39	1	1	35.39	1	1	35.40	1
5	65.09	5	65.36	1	5	65.36	1	9	51.62	0	5	65.36	1	5	65.32	1
				100.00			93.33			33.33			100.00			100.00

Tabla A. 11 Resultados de pruebas aleatorias sin ruido aplicadas a la red de Hanoi

<i>Resultados de pruebas en nodos y magnitudes aleatorias con ruido en la demanda</i>																
<i>Prueba</i>	<i>Método Binarización</i>				<i>Método Correlación</i>			<i>Método Distancia</i>			<i>Método Ángulo</i>			<i>Método Optimización</i>		
<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>
3	34.16	12	6.29	0	7	18.93	0	2	33.69	0	3	33.76	1	3	34.06	1
24	33.88	24	33.19	1	24	33.19	1	22	31.54	0	24	33.19	1	24	33.76	1
16	59.88	16	59.34	1	16	59.34	1	16	59.34	1	16	59.34	1	16	61.09	1
30	43.87	30	43.35	1	30	43.35	1	31	42.57	0	30	43.35	1	30	43.94	1
16	51.54	16	51.83	1	16	51.83	1	16	51.83	1	16	51.83	1	16	52.65	1
25	52.02	25	52.50	1	25	52.50	1	25	52.50	1	25	52.50	1	25	53.02	1
31	56.99	31	57.40	1	31	57.40	1	30	47.02	0	31	57.40	1	31	56.84	1
15	54.51	15	54.89	1	15	54.89	1	15	54.89	1	15	54.89	1	15	53.87	1
19	27.83	21	3.60	0	19	28.10	1	2	28.25	0	19	28.10	1	19	28.76	1
1	44.44	21	0.16	0	5	0.95	0	1	43.40	1	1	43.40	1	11	0.60	0
4	36.98	12	8.07	0	6	26.87	0	2	35.46	0	4	35.54	1	4	35.25	1
2	45.92	12	6.70	0	3	35.69	0	2	46.00	1	2	46.00	1	2	46.52	1
13	60.53	13	60.76	1	13	60.76	1	13	60.76	1	13	60.76	1	13	60.13	1
30	37.95	30	37.34	1	30	37.34	1	23	35.77	0	30	37.34	1	30	37.93	1
24	37.48	24	36.75	1	23	35.39	0	22	34.80	0	24	36.75	1	24	36.28	1
				66.67			66.67			46.67			100.00			93.33

Tabla A. 12 Resultados de pruebas aleatorias con ruido en la demanda de 1 a 3% aplicadas a la red de hanoi

<i>Resultados de pruebas en nodos y magnitudes aleatorias con ruido en la medición</i>																
<i>Prueba</i>		<i>Método Binarización</i>			<i>Método Correlación</i>			<i>Método Distancia</i>			<i>Método Ángulo</i>			<i>Método Optimización</i>		
<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>
20	69.87	20	72.00	1	20	72.00	1	20	72.00	1	20	72.00	1	20	71.12	1
8	41.12	12	14.37	0	5	40.15	0	5	40.15	0	8	40.54	1	8	40.84	1
24	46.26	30	30.80	0	31	37.14	0	24	46.74	1	24	46.74	1	24	46.18	1
5	68.93	12	20.26	0	4	68.33	0	10	46.75	0	5	69.52	1	5	69.43	1
25	41.41	25	41.28	1	25	41.28	1	25	41.28	1	25	41.28	1	25	41.40	1
17	44.23	17	44.10	1	17	44.10	1	17	44.10	1	17	44.10	1	17	43.91	1
25	29.50	25	29.13	1	25	29.13	1	19	26.77	0	25	29.13	1	25	29.18	1
19	54.18	21	7.00	0	19	54.17	1	19	54.17	1	19	54.17	1	19	54.40	1
26	33.36	26	32.04	1	26	32.04	1	22	27.38	0	26	32.04	1	26	32.97	1
24	52.54	24	52.55	1	31	42.07	0	24	52.55	1	24	52.55	1	24	52.46	1
1	43.76	12	0.62	0	5	1.80	0	1	50.98	1	1	50.98	1	1	42.19	1
29	66.45	29	68.34	1	29	68.34	1	29	68.34	1	29	68.34	1	29	67.41	1
7	53.78	12	17.56	0	5	53.07	0	8	50.34	0	7	54.22	1	7	53.83	1
18	34.85	17	13.32	0	18	34.26	1	2	33.13	0	18	34.26	1	18	34.70	1
10	52.17	11	36.94	0	10	51.91	1	10	51.91	1	10	51.91	1	10	52.31	1
				46.67			60.00			60.00			100.00			100.00

Tabla A. 13 Resultados de pruebas aleatorias con ruido en la medición entre 1 y 3% aplicadas a la red de Hanoi

<i>Resultados de pruebas en nodos y magnitudes aleatorias con ruido en la demanda y en la medición</i>																
<i>Prueba</i>	<i>Método Binarización</i>				<i>Método Correlación</i>			<i>Método Distancia</i>			<i>Método Ángulo</i>			<i>Método Optimización</i>		
<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>
2	28.89	12	4.25	0	30	5.87	0	2	28.51	1	2	28.51	1	2	28.54	1
21	47.66	21	47.39	1	21	47.39	1	21	47.39	1	21	47.39	1	21	47.81	1
19	20.23	27	5.48	0	21	2.70	0	2	22.44	0	19	19.79	1	19	20.63	1
21	37.87	21	36.18	1	21	36.18	1	21	36.18	1	21	36.18	1	21	36.52	1
19	25.36	21	3.56	0	23	14.34	0	2	24.68	0	19	25.80	1	19	26.75	1
4	59.97	12	14.12	0	4	59.86	1	5	48.48	0	4	59.86	1	4	60.38	1
25	78.29	25	80.54	1	25	80.54	1	26	58.31	0	25	80.54	1	25	79.42	1
18	24.46	16	5.71	0	3	18.93	0	1	48.63	0	18	24.42	1	18	22.45	1
22	57.06	27	18.31	0	31	28.64	0	22	57.18	1	22	57.18	1	22	56.04	1
15	40.98	15	40.96	1	15	40.96	1	15	40.96	1	15	40.96	1	15	41.50	1
15	41.11	15	40.89	1	15	40.89	1	15	40.89	1	15	40.89	1	15	41.33	1
22	72.03	27	24.06	0	23	54.29	0	24	45.62	0	22	73.68	1	22	73.80	1
31	71.92	31	72.84	1	31	72.84	1	30	59.01	0	31	72.84	1	31	71.35	1
22	28.24	27	9.39	0	19	27.56	0	2	25.75	0	22	28.49	1	22	27.35	1
20	43.92	20	43.03	1	20	43.03	1	20	43.03	1	20	43.03	1	20	42.08	1
				46.67			53.33			46.67			100.00			100.00

Tabla A. 14 Resultados de pruebas aleatorias con incertidumbre de ruido en la demanda y en la medición de entre 1 y 3% aplicadas a la red de Hanoi.

Resultados de pruebas aleatorias aplicadas a la Red de Benchmark

<i>Resultados de pruebas en nodos y magnitudes aleatorias sin ruido</i>																
<i>Prueba</i>	<i>Método Binarización</i>				<i>Método Correlación</i>			<i>Método Distancia</i>			<i>Método Ángulo</i>			<i>Método Optimización</i>		
<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>
6	0.51	6	0.51	1	6	0.51	1	8	0.42	0	6	0.51	1	6	0.51	1
1	0.62	1	0.62	1	1	0.62	1	8	0.37	0	1	0.62	1	1	0.62	1
9	0.17	9	0.17	1	9	0.17	1	3	0.16	0	9	0.17	1	9	0.17	1
5	0.15	5	0.15	1	5	0.15	1	1	0.14	0	5	0.15	1	5	0.15	1
1	0.37	1	0.37	1	1	0.37	1	9	0.23	0	1	0.37	1	1	0.37	1
2	0.57	2	0.57	1	2	0.57	1	8	0.37	0	2	0.57	1	2	0.57	1
10	0.61	10	0.61	1	10	0.61	1	8	0.57	0	10	0.61	1	10	0.61	1
9	0.32	9	0.32	1	9	0.32	1	8	0.30	0	9	0.32	1	9	0.32	1
7	0.92	7	0.93	1	7	0.93	1	8	0.74	0	7	0.93	1	7	0.93	1
1	0.84	1	0.85	1	1	0.85	1	8	0.51	0	1	0.85	1	1	0.85	1
4	0.50	4	0.50	1	4	0.50	1	9	0.37	0	4	0.50	1	4	0.50	1
5	0.98	5	1.00	1	5	1.00	1	8	0.85	0	5	1.00	1	5	0.99	1
1	0.62	1	0.62	1	1	0.62	1	8	0.37	0	1	0.62	1	1	0.62	1
6	0.31	6	0.31	1	6	0.31	1	9	0.27	0	6	0.31	1	6	0.31	1
4	0.83	4	0.84	1	4	0.84	1	9	0.62	0	4	0.84	1	4	0.84	1
				100.00			100.00			0.00			100.00			100.00

Tabla A. 15 Resultados de pruebas aleatorias sin ruido aplicadas a la red de Benchmark

<i>Resultados de pruebas en nodos y magnitudes aleatorias con ruido en la demanda</i>																
<i>Prueba</i>	<i>Método Binarización</i>			<i>Método Correlación</i>			<i>Método Distancia</i>			<i>Método Ángulo</i>			<i>Método Optimización</i>			
<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>
10	0.21	10	0.20	1	10	0.20	1	10	0.20	1	10	0.20	1	9	0.19	0
4	0.19	3	0.15	0	3	0.15	0	4	0.16	1	4	0.16	1	4	0.16	1
3	0.90	3	0.91	1	3	0.91	1	8	0.68	0	3	0.91	1	3	0.90	1
5	0.13	5	0.14	1	5	0.14	1	2	0.13	0	5	0.14	1	10	0.13	0
3	0.86	3	0.87	1	3	0.87	1	8	0.64	0	3	0.87	1	3	0.88	1
5	0.56	5	0.61	1	5	0.61	1	8	0.52	0	5	0.61	1	6	0.60	0
7	0.20	7	0.18	1	7	0.18	1	4	0.18	0	7	0.18	1	4	0.15	0
6	0.54	6	0.52	1	6	0.52	1	8	0.43	0	6	0.52	1	6	0.53	1
4	0.64	3	0.58	0	4	0.62	1	8	0.45	0	4	0.62	1	3	0.63	0
9	0.18	9	0.14	1	9	0.14	1	4	0.11	0	9	0.14	1	7	0.14	0
4	0.98	3	0.93	0	4	1.00	1	8	0.73	0	4	1.00	1	4	0.97	1
5	0.69	5	0.73	1	5	0.73	1	8	0.62	0	5	0.73	1	5	0.72	1
6	0.52	6	0.54	1	6	0.54	1	8	0.45	0	6	0.54	1	5	0.53	0
1	0.88	1	0.89	1	1	0.89	1	8	0.54	0	1	0.89	1	1	0.88	1
3	0.34	3	0.34	1	3	0.34	1	9	0.26	0	3	0.34	1	6	0.31	0
				80.00			93.33			13.33			100.00			46.67

Tabla A. 16 Resultados de pruebas aleatorias con ruido en la demanda de 1 a 3% aplicadas a la red de Benchmark

<i>Resultados de pruebas en nodos y magnitudes aleatorias con ruido en la medición</i>																
<i>Prueba</i>	<i>Método Binarización</i>				<i>Método Correlación</i>			<i>Método Distancia</i>			<i>Método Ángulo</i>			<i>Método Optimización</i>		
<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>
1	0.58	1	0.58	1	1	0.58	1	8	0.35	0	1	0.58	1	1	0.58	1
7	0.76	7	0.77	1	7	0.77	1	8	0.61	0	7	0.77	1	7	0.77	1
6	0.93	6	0.93	1	6	0.93	1	8	0.78	0	6	0.93	1	6	0.93	1
8	0.13	8	0.13	1	8	0.13	1	1	0.12	0	8	0.13	1	8	0.13	1
1	0.84	1	0.85	1	1	0.85	1	8	0.51	0	1	0.85	1	1	0.85	1
1	0.86	1	0.87	1	1	0.87	1	8	0.52	0	1	0.87	1	1	0.87	1
6	0.52	6	0.52	1	6	0.52	1	8	0.44	0	6	0.52	1	6	0.52	1
8	0.43	8	0.44	1	8	0.44	1	8	0.44	1	8	0.44	1	8	0.43	1
2	0.17	2	0.17	1	2	0.17	1	1	0.16	0	2	0.17	1	2	0.17	1
6	0.25	6	0.25	1	6	0.25	1	9	0.22	0	6	0.25	1	6	0.25	1
6	0.70	6	0.71	1	6	0.71	1	8	0.59	0	6	0.71	1	6	0.71	1
7	0.63	7	0.63	1	7	0.63	1	8	0.51	0	7	0.63	1	7	0.63	1
1	0.70	1	0.70	1	1	0.70	1	8	0.42	0	1	0.70	1	1	0.70	1
3	0.51	3	0.51	1	3	0.51	1	8	0.37	0	3	0.51	1	3	0.51	1
2	0.81	2	0.82	1	2	0.82	1	8	0.53	0	2	0.82	1	2	0.82	1
				100.00			100.00			6.67			100.00			100.00

Tabla A. 17 Resultados de pruebas aleatorias con ruido en la medición entre 1 y 3% aplicadas a la red de Benchmark

<i>Resultados de pruebas en nodos y magnitudes aleatorias con ruido en la demanda y en la medición</i>																
<i>Prueba</i>	<i>Método Binarización</i>			<i>Método Correlación</i>			<i>Método Distancia</i>			<i>Método Ángulo</i>			<i>Método Optimización</i>			
<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>
3	0.82	3	0.83	1	3	0.83	1	8	0.61	0	3	0.83	1	3	0.80	1
8	0.30	8	0.32	1	8	0.32	1	8	0.32	1	8	0.32	1	6	0.32	0
1	0.44	1	0.39	1	1	0.39	1	6	0.25	0	1	0.39	1	2	0.35	0
8	0.92	8	1.03	1	8	1.03	1	8	1.03	1	8	1.03	1	8	1.03	1
3	0.21	3	0.24	1	3	0.24	1	6	0.21	0	3	0.24	1	7	0.26	0
5	0.14	6	0.13	0	5	0.14	1	4	0.13	0	5	0.14	1	4	0.17	0
3	0.72	3	0.73	1	3	0.73	1	8	0.54	0	3	0.73	1	3	0.73	1
2	0.37	2	0.39	1	2	0.39	1	9	0.26	0	2	0.39	1	3	0.34	0
4	1.00	3	0.95	0	4	1.02	1	9	0.76	0	4	1.02	1	4	1.03	1
7	0.27	6	0.23	0	7	0.25	1	6	0.23	0	7	0.25	1	9	0.23	0
1	0.60	1	0.59	1	2	0.55	0	8	0.36	0	1	0.59	1	1	0.59	1
7	0.63	7	0.62	1	7	0.62	1	10	0.50	0	7	0.62	1	6	0.61	0
3	0.55	3	0.53	1	3	0.53	1	9	0.40	0	3	0.53	1	4	0.56	0
4	0.52	3	0.50	0	4	0.54	1	9	0.40	0	4	0.54	1	7	0.50	0
5	0.24	5	0.23	1	5	0.23	1	5	0.23	1	5	0.23	1	5	0.19	1
				73.33			93.33			20.00			100.00			40.00

Tabla A. 18 Resultados de pruebas aleatorias con incertidumbre de ruido en la demanda y en la medición de entre 1 y 3% aplicadas a la red de Benchmark.

Resultados de pruebas aleatorias aplicadas a la Red de Quebra

<i>Resultados de pruebas en nodos y magnitudes aleatorias sin ruido</i>																
<i>Prueba</i>		<i>Método Binarización</i>			<i>Método Correlación</i>			<i>Método Distancia</i>			<i>Método Ángulo</i>			<i>Método Optimización</i>		
<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>
23	0.0655	23	0.075	1	23	0.075	1	25	0.067	0	23	0.075	1	23	0.067	1
22	0.0665	22	0.074	1	22	0.074	1	25	0.068	0	22	0.074	1	22	0.068	1
12	0.0118	12	0.012	1	12	0.012	1	6	0.009	0	12	0.012	1	12	0.012	1
52	0.0901	46	0.106	0	52	0.091	1	51	0.092	0	52	0.091	1	52	0.092	1
32	0.0175	32	0.017	1	32	0.017	1	33	0.017	0	32	0.017	1	32	0.017	1
9	0.0895	9	0.091	1	45	0.098	0	52	0.090	0	45	0.098	0	45	0.091	0
7	0.022	7	0.022	1	7	0.022	1	26	0.019	0	7	0.022	1	7	0.022	1
43	0.0745	43	0.076	1	43	0.076	1	43	0.076	1	43	0.076	1	43	0.076	1
17	0.012	17	0.012	1	17	0.012	1	17	0.012	1	17	0.012	1	17	0.012	1
39	0.0193	39	0.019	1	39	0.019	1	39	0.019	1	39	0.019	1	39	0.019	1
7	0.0834	7	0.089	1	7	0.089	1	26	0.078	0	7	0.089	1	7	0.084	1
8	0.0633	8	0.067	1	8	0.067	1	3	0.011	0	8	0.067	1	8	0.064	1
54	0.0331	35	0.033	0	54	0.033	1	45	0.008	0	54	0.033	1	54	0.033	1
10	0.0115	10	0.011	1	10	0.011	1	6	0.011	0	10	0.011	1	10	0.011	1
39	0.0881	39	0.088	1	39	0.088	1	39	0.088	1	39	0.088	1	39	0.090	1
				86.67			93.33			26.67			93.33			93.33

Tabla A. 19 Resultados de pruebas aleatorias sin ruido aplicadas a la red de Quebra

Resultados de pruebas en nodos y magnitudes aleatorias con ruido en la demanda

<i>Prueba</i>		<i>Método Binarización</i>			<i>Método Correlación</i>			<i>Método Distancia</i>			<i>Método Ángulo -</i>			<i>Método Optimización</i>		
<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>
18	0.0775	18	0.080	1	18	0.080	1	18	0.080	1	18	0.080	1	18	0.084	1
30	0.034	30	0.034	1	30	0.034	1	33	0.029	0	30	0.034	1	30	0.034	1
17	0.0179	17	0.018	1	17	0.018	1	17	0.018	1	17	0.018	1	17	0.018	1
41	0.0664	41	0.072	1	41	0.072	1	50	0.064	0	41	0.072	1	41	0.067	1
52	0.0502	46	0.055	0	52	0.050	1	51	0.051	0	52	0.050	1	52	0.051	1
52	0.0554	46	0.062	0	52	0.056	1	51	0.056	0	52	0.056	1	52	0.056	1
53	0.0795	53	0.080	1	53	0.080	1	9	0.098	0	53	0.080	1	53	0.080	1
39	0.0908	39	0.091	1	39	0.091	1	39	0.091	1	39	0.091	1	39	0.092	1
33	0.0349	33	0.035	1	33	0.035	1	44	0.038	0	33	0.035	1	33	0.035	1
32	0.0156	32	0.016	1	32	0.016	1	32	0.016	1	32	0.016	1	32	0.016	1
31	0.0933	31	0.096	1	31	0.096	1	45	0.021	0	31	0.096	1	31	0.094	1
26	0.086	26	0.092	1	26	0.092	1	26	0.092	1	26	0.092	1	26	0.087	1
14	0.0622	14	0.065	1	14	0.065	1	18	0.064	0	14	0.065	1	14	0.064	1
23	0.0888	23	0.107	1	23	0.107	1	25	0.091	0	23	0.107	1	23	0.092	1
28	0.0455	28	0.046	1	28	0.046	1	10	0.009	0	28	0.046	1	28	0.046	1
				86.67			100.00			33.33			100.00			100.00

Tabla A. 20 Resultados de pruebas aleatorias con ruido en la demanda de 1 a 3% aplicadas a la red de Quebra

<i>Resultados de pruebas en nodos y magnitudes aleatorias con ruido en la medición</i>																
<i>Prueba</i>		<i>Método Binarización</i>			<i>Método Correlación</i>			<i>Método Distancia</i>			<i>Método Ángulo</i>			<i>Método Optimización</i>		
<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>
24	0.0407	24	0.041	1	24	0.041	1	25	0.043	0	24	0.041	1	24	0.041	1
33	0.0494	33	0.053	1	33	0.053	1	44	0.050	0	33	0.053	1	33	0.050	1
26	0.0429	26	-0.122	1	26	-0.122	1	26	-0.122	1	26	-0.122	1	26	0.043	1
25	0.0109	25	0.008	1	25	0.008	1	25	0.008	1	25	0.008	1	25	0.011	1
32	0.0236	32	0.015	1	32	0.015	1	36	0.014	0	32	0.015	1	32	0.024	1
24	0.0444	24	0.046	1	24	0.046	1	25	0.033	0	24	0.046	1	24	0.045	1
13	0.0863	13	0.095	1	13	0.095	1	9	0.094	0	13	0.095	1	13	0.087	1
49	0.0581	49	0.070	1	49	0.070	1	50	0.093	0	49	0.070	1	49	0.059	1
54	0.0823	35	0.086	0	54	0.024	1	45	0.022	0	54	0.024	1	54	0.083	1
22	0.0259	22	0.025	1	22	0.025	1	22	0.025	1	22	0.025	1	22	0.026	1
48	0.0741	48	0.067	1	48	0.067	1	48	0.067	1	48	0.067	1	48	0.077	1
9	0.0713	9	0.077	1	45	0.077	0	52	0.072	0	45	0.077	0	45	0.072	0
24	0.0328	24	0.027	1	24	0.027	1	25	0.019	0	24	0.027	1	24	0.033	1
17	0.0753	17	0.081	1	17	0.081	1	17	0.081	1	17	0.081	1	17	0.081	1
48	0.0246	48	0.034	1	48	0.034	1	48	0.034	1	48	0.034	1	48	0.025	1
				93.33			93.33			40.00			93.33			93.33

Tabla A. 21 Resultados de pruebas aleatorias con ruido en la medición entre 1 y 3% aplicadas a la red de Quebra

<i>Resultados de pruebas en nodos y magnitudes aleatorias con ruido en la demanda y en la medición</i>																
<i>Prueba</i>	<i>Método Binarización</i>				<i>Método Correlación</i>			<i>Método Distancia</i>			<i>Método Ángulo</i>			<i>Método Optimización</i>		
<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>	<i>Índice</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Exactitud</i>
29	0.0469	11	0.043	0	29	0.039	1	9	0.024	0	29	0.039	1	29	0.047	1
34	0.0907	34	0.103	1	34	0.103	1	45	0.021	0	34	0.103	1	34	0.091	1
2	0.0972	2	0.111	1	2	0.111	1	3	0.068	0	2	0.111	1	2	0.099	1
45	0.0349	9	0.033	0	45	0.036	1	48	0.040	0	45	0.036	1	45	0.035	1
38	0.0289	38	-0.034	1	38	-0.034	1	39	-0.077	0	38	-0.034	1	38	0.029	1
40	0.0434	40	0.045	1	40	0.045	1	49	0.042	0	40	0.045	1	40	0.044	1
31	0.0717	35	0.073	0	31	0.069	1	45	0.017	0	31	0.069	1	31	0.072	1
11	0.0746	11	0.067	1	11	0.067	1	9	0.089	0	11	0.067	1	11	0.079	1
52	0.0656	46	0.074	0	52	0.049	1	51	0.043	0	52	0.049	1	52	0.067	1
42	0.0301	42	0.036	1	42	0.036	1	43	0.031	0	42	0.036	1	42	0.030	1
32	0.0432	32	0.044	1	32	0.044	1	44	0.049	0	32	0.044	1	32	0.044	1
2	0.0946	2	0.108	1	2	0.108	1	3	0.066	0	2	0.108	1	2	0.097	1
16	0.0991	16	0.106	1	16	0.106	1	16	0.106	1	16	0.106	1	16	0.109	1
6	0.0587	53	0.100	0	6	0.053	1	8	0.010	0	6	0.053	1	6	0.059	1
3	0.0258	3	0.027	1	3	0.027	1	3	0.027	1	3	0.027	1	3	0.026	1
				66.67			100.00			13.33			100.00			100.00

Tabla A. 22 Resultados de pruebas aleatorias con incertidumbre de ruido en la demanda y en la medición de entre 1 y 3% aplicadas a la red de Quebra.

Bibliografía

- [1] G. Cembrano, J. Quevedo, V. Puig, J.Figueras, R. Pérez. Mejoras en la gestión del agua con técnicas de modelado y control *Journal de Tecnología del Agua* (2006), Pág. (28-32)
- [2] Lewis A. Rossman, Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, Epanet 2 Manual Del Usuario. Traducción al español: Fernando Martínez Alzamora, Grupo REDHISP. *Inst. Ingeniería del Agua y M.A*, Universidad Politécnica de Valencia (España)
- [3] Katya Rodríguez Vazquez, Óscar Arturo Fuentes Mariles, Martín Rubén Jiménez Magaña, Faustino de Luna Cruz, Diseño Óptimo De Redes De Distribución De Agua Potable Utilizando Un Algoritmo Genético Multiobjetivo, Vi Serea - *Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água*, João Pessoa (Brasil), 5 a 7 de junho de 2006.
- [4] Richard Church Charles Revelle. The Maximal Covering Location Problem. The Johns Hopkins University. *Papers of the Regional Science Association*, Volume Thirty two.
- [5] Jin Yang, Yumei Wen, Ping Li Leak location using blind system identification in water distribution pipeline, *Journal of Sound and Vibration* 310 (2008) 134–148.
- [6] H.V. Fuchs, R. Riehle, Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis, *Applied Acoustics* 33 (1991) 1–19.
- [7] J.M. Muggleton, M.J. Brennan, R.J. Pinnington, Wavenumber prediction of waves in buried pipes for water leak detection, *Journal of Sound and Vibration* 249 (5) (2002) 939–954.
- [8] J.M. Muggleton, M.J. Brennan, P.W. Linford, Axisymmetric wave propagation in fluid-filled pipes: wavenumber measurements in vacuo and buried pipes, *Journal of Sound and Vibration* 270 (1–2) (2004) 171–190.
- [9] J.M. Muggleton, M.J. Brennan, Leak noise propagation and attenuation in submerged plastic water pipes, *Journal of Sound and Vibration* 278 (3) (2004) 527–537.
- [10] Y. Sato, A method of self-recovering equalization for multilevel amplitude-modulation, *IEEE Transactions on Communication* 23 (6), (1975) 679–682.
- [11] Jin Yang, Yumei Wen, Ping Li Leak location using blind system identification in water distribution pipeline, *Journal of Sound and Vibration* 310 (2008) 134–148
- [12] By Ranko S. Pudar,¹ Associate Member, ASCE, and James A. Liggett,² Member, ASCE, LEAKS IN PIPE NETWORKS

- [13] John Mashford, Dhammika De Silva, Donovan Marney and Stewart Burn. An approach to leak detection in pipe networks using analysis of monitored pressure values by support vector machine. *Third International Conference on Network and System Security* (2009) 534-539
- [14] Dídia Covas and Helena Ramos, Hydraulic Transients used for Leakage Detection in Water Distribution Systems, Instituto Superior Técnico, Dept. Civil Engineering, Lisbon, Portugal
- [15] Davide Barcelli. Decomposizione ottima e controllo predittivo distribuito della rete idrica di Barcellona. Master's thesis, Università di Siena, Facoltà di Ingegneria Informatica, Technical University of Catalonia, 2008.
- [16] M.A. Brdys and B. Ulanicki. Operational control of water systems: structures, algorithms, and applications. *Prentice Hall International*, UK, 1994.
- [17] J. Lopez, G. Cembrano, and F. Cellier. Time series prediction using fuzzy inductive reasoning. *In Proceedings of the European simulation multiconference*, ESM, volume 96, pages 765–770, San Diego: SCS International, 1996.
- [18] M. A. Brdys, B. Ulanicki, Operacional Control of Water Systems Structures, Algorithms and applications, Prentice Hall.
- [19] Haykin Simon. "Neural networks a comprehensive foundation" 2ed. Prentice Hall 1999
- [20] Santiago Arnalich Castañeda, Introducción al cálculo de redes de agua por ordenador, unam 2007
- [21] Todini, E. y Pilati, S. 1987. "A gradient method for the analysis of pipe networks". *International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution*, Leicester Polytechnic, UK, September 8-10.
- [22] George, A. y Liu, J. W-H. 1981. *Computer Solution of Large Sparse Positive Definite Systems*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- [23] Enrique Cabrera, Miguel A. Pardo, Ricardo Cobacho y Enrique Cabrera Jr. Energy audit of water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Valencia España
- [24] EPANET Programmer's Toolkit user's manual
<http://www.arnalich.com/w/epanet/descargascasosok.html>
- [25] José Ragot, Didier Maquin. Fault measurement detection in an urban water supply network. *Journal of Process Control* 16 (2006) 887–902
- [26] Jorge Vento y Vicenç Puig, Leak Detection and Isolation in Pressurized Water Pipe Networks using Interval LPV models, *8th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems*, September 1-3, 2010.

[27] Blesa, Joaquim, Puig, Vicenc, Saludes, Jordi, Vento, Jorge, Leak Detection, Isolation and Estimation in Pressurized Water Pipe Networks Using LPV Models and Zonotopes, *Nonlinear Control Systems, Volume # 1*, Italy 2010

[28] Ramon Pérez, Vicenç Puig, Josep Pascual, Joseba Quevedo, Edson Landeros, Antonio Peralta, Leakage Isolation using Pressure Sensitivity Analysis in Water Distribution Networks: Application to the Barcelona case study, *12th IFAC Symposium on Large-Scale Systems: Theory and Applications*, 2010, p. 1-6.

[29] J. Gertler, J. Romera, V. Puig and J. Quevedo, Leak detection and isolation in water distribution networks using principal components analysis and structured residuals. *"2010 Conference on Control and Fault Tolerant Systems. Final program and book of abstracts"*. IEEE Press. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010, p. 191-196.

Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey



30002007421167

<http://biblioteca.mty.itesm.mx>