

**OPTIMIZACIÓN DEL ÍNDICE DE RESILIENCIA Y UNIFORMIZACIÓN
DE LA PRESIÓN COMO CRITERIOS PARA RENOVAR TUBERÍAS
EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE ACUEDUCTOS**

SERGIO ANDRÉS TORRES MARTÍNEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2011

**OPTIMIZACIÓN DEL ÍNDICE DE RESILIENCIA Y UNIFORMIZACIÓN
DE LA PRESIÓN COMO CRITERIOS PARA RENOVAR TUBERÍAS
EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE ACUEDUCTOS**

SERGIO ANDRÉS TORRES MARTÍNEZ

Trabajo de investigación, requisito para optar al título de
Ingeniero civil

Director:

LUIS FERNANDO CASTAÑEDA GALVIS

M.Eng, Ingeniero civil.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2011

A mi Mamá, a mi Papá, y mi Abuelita.

AGRADECIMIENTOS

Al director de proyecto, M. Eng. Luis Fernando Castañeda Galvis, por sus valiosas y siempre disponibles orientaciones.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	13
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	OBJETIVO GENERAL.....	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3	CONCEPTOS FUNDAMENTALES.....	16
3.1	MEJORAMIENTO ÓPTIMO DE REDES: IDEAS GENERALES.....	16
3.2	CONFIABILIDAD HIDRÁULICA DE LAS REDES.....	20
3.2.1	<i>Definición.....</i>	20
3.2.2	<i>Medidas sustitutivas.....</i>	21
3.3	FUGAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN.....	26
3.4	PLANO ÓPTIMO DE PRESIONES: IDEA GENERAL.....	29
3.5	COSTOS Y AHORROS DERIVADOS DE LA RENOVACIÓN DE TUBERÍAS.....	31
3.6	PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO.....	33
3.6.1	<i>Generalidades.....</i>	33
3.6.2	<i>Método de la suma ponderada exponencial.....</i>	35
3.7	EL “TOOLKIT” DE EPANET.....	38
4	ALGUNAS METODOLOGÍAS DE MEJORA ÓPTIMA DE REDES.....	39
5	METODOLOGÍA.....	43
5.1	OBJETIVOS.....	43
5.1.1	<i>Maximizar el Índice de Resiliencia (In).....</i>	43
5.1.2	<i>Maximizar el coeficiente de uniformidad de presiones (CU).....</i>	44
5.2	FUNCIÓN OBJETIVO.....	45
5.3	COSTOS Y BENEFICIOS CONSIDERADOS.....	45
5.3.1	<i>Ahorro en el costo de agua no contabilizada.....</i>	46
5.3.2	<i>Adquisición e implantación de tuberías.....</i>	46
5.4	RESTRICCIONES.....	47
5.5	ALGORITMO.....	47
6	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	51
6.1	RED EJEMPLO 1.....	51
6.1.1	<i>Resultados.....</i>	53

6.2	REDEJEMPLO 2	57
6.2.1	<i>Resultados</i>	59
6.3	REDEJEMPLO 3	64
6.3.1	<i>Resultados</i>	66
7	CONCLUSIONES	71
8	BIBLIOGRAFÍA	72

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE MEJORAMIENTO DE REDES. ADAPTADO DE CHEUNG, P.B. [4]	19
FIGURA 2. PLANO DE PRESIONES 1. FUENTE: ARAQUE, D. [2]	29
FIGURA 3. PLANO DE PRESIONES 2. FUENTE: ARAQUE, D. [2]	30
FIGURA 4. FORMULARIO PARA ASIGNAR LOS DATOS DE ENTRADA.	48
FIGURA 5. RED EJEMPLO 1. PRESIONES EN NODOS EN LA HORA CERO E ID DE CADA TUBO.	51
FIGURA 6. EVOLUCIÓN DEL IR A LO LARGO DEL DÍA LUEGO DE 25 CAMBIOS. RED EJEMPLO 1.....	53
FIGURA 7. EVOLUCIÓN DEL CU A LO LARGO DEL DÍA LUEGO DE 25 CAMBIOS. RED EJEMPLO 1.....	53
FIGURA 8. IR VS NÚMERO DE CAMBIOS. RED EJEMPLO 1	54
FIGURA 9. CU VS NÚMERO DE CAMBIOS. RED EJEMPLO 1	54
FIGURA 10. . COSTO [\\$] DE LA RENOVACIÓN VS NÚMERO DE CAMBIOS. RED EJEMPLO 1	55
FIGURA 11. COSTO AGUA FUGADA ANUAL [\\$] VS NÚMERO DE CAMBIOS. RED EJEMPLO 1.....	55
FIGURA 12. PORCENTAJE DE FUGAS VS NÚMERO DE CAMBIOS. RED EJEMPLO 1.....	55
FIGURA 13. RANGO DE PRESIONES [MCA] VS NÚMERO DE CAMBIOS. RED EJEMPLO 1	56
FIGURA 14. PRESIÓN PROMEDIO [MCA] VS NÚMERO DE CAMBIOS. RED EJEMPLO 1.....	56
FIGURA 15. RED EJEMPLO 2. PRESIONES EN NODOS EN LA HORA CERO, E ID DE CADA TUBO.	57
FIGURA 16. LISTA DE CAMBIOS PRIORITARIOS PARA CADA VALOR DE W1. RED EJEMPLO 2	59
FIGURA 17 EVOLUCIÓN DEL IR A LO LARGO DEL DÍA LUEGO DE 30 CAMBIOS. RED EJEMPLO 2.....	60
FIGURA 18. . EVOLUCIÓN DEL CU A LO LARGO DEL DÍA LUEGO DE 30 CAMBIOS. RED EJEMPLO 2	60
FIGURA 19. . IR EN INSTANTE DE MÍNIMA PRESIÓN VS NÚMERO DE CAMBIOS. RED EJEMPLO 2.....	61
FIGURA 20. CU EN INSTANTE DE MÍNIMA PRESIÓN VS NÚMERO DE CAMBIOS. RED EJEMPLO 2	61
FIGURA 21. COSTO DE RENOVACIÓN [\\$] VS NÚMERO DE CAMBIOS. RED EJEMPLO 2.....	62
FIGURA 22. COSTO DEL AGUA FUGADA ANUAL [\\$] VS NÚMERO DE CAMBIOS. RED EJEMPLO 2.....	62
FIGURA 23. PORCENTAJE DE FUGAS VS NÚMERO DE CAMBIOS. RED EJEMPLO 2	62
FIGURA 24. RANGO DE PRESIONES [MCA] VS NÚMERO DE CAMBIOS. RED EJEMPLO 2	63
FIGURA 25. PRESIÓN PROMEDIO [MCA] VS NÚMERO DE CAMBIOS. RED EJEMPLO 2	63
FIGURA 26. RED EJEMPLO 3	64
FIGURA 27. LISTA DE CAMBIOS PRIORITARIOS PARA CADA VALOR DE W1. RED EJEMPLO 3	66
FIGURA 28. EVOLUCIÓN DEL IR A LO LARGO DEL DÍA LUEGO DE 50 CAMBIOS. RED EJEMPLO 3.....	67
FIGURA 29. EVOLUCIÓN DEL CU A LO LARGO DEL DÍA LUEGO DE 50 CAMBIOS. RED EJEMPLO 3.....	67
FIGURA 30. IR EN LA HORA CERO VS NÚMERO DE CAMBIOS. RED EJEMPLO 3.....	68
FIGURA 31. CU EN LA HORA CERO VS NÚMERO DE CAMBIOS. RED EJEMPLO 3.....	68
FIGURA 32. COSTO DE RENOVACIÓN VS NÚMERO DE CAMBIOS. RED EJEMPLO 3.....	69

FIGURA 33. COSTO DEL AGUA FUGADA ANUAL VS NÚMERO DE CAMBIOS. RED EJEMPLO 3	69
FIGURA 34. RANGO DE PRESIONES EN LA HORA CERO VS NÚMERO DE CAMBIOS. RED EJEMPLO 3	70
FIGURA 35. PRESIÓN PROMEDIO EN LA HORA CERO VS NÚMERO DE CAMBIOS. RED EJEMPLO 3	70
FIGURA 36. ALTURA PIEZOMÉTRICA A LA ENTRADA DE LA RED EN LA HORA CERO VS NÚMERO DE CAMBIOS. RED EJEMPLO 3	70

RESUMEN

TÍTULO:

OPTIMIZACIÓN DEL ÍNDICE DE RESILIENCIA Y UNIFORMIZACIÓN DE LA PRESIÓN COMO CRITERIOS PARA RENOVAR TUBERÍAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE ACUEDUCTOS^I

AUTOR:

SERGIO ANDRÉS TORRES MARTÍNEZ^{II}

PALABRAS CLAVES:

Redes de distribución de agua potable, índice de resiliencia, presión en redes de distribución, renovación de tuberías, fugas, Epanet toolkit.

DESCRIPCIÓN:

Para determinar la prioridad de reposición de una de tubería en una red de distribución de agua potable, en un programa de mantenimiento preventivo; usualmente se considera como primer criterio a la probabilidad de fallo. Sería deseable a continuación, considerar más criterios para dar más soporte y complemento a la asignación de prioridades de reposición de las tuberías y de este modo construir un programa de renovación más integral.

En este trabajo se programa y aplica una metodología que busca mejorar la confiabilidad hidráulica y mitigar las fugas en toda la red. Para lograr esto se recurre al mejoramiento óptimo de dos indicadores de desempeño hidráulico global de la red: el índice de resiliencia y el coeficiente de uniformidad de presiones; mediante el incremento del diámetro de los tubos de la red. Se considera además la reducción de la presión a la entrada de la red como restricción complementaria. El índice de resiliencia es una medida de confiabilidad hidráulica y el coeficiente de uniformidad de presiones, como su mismo nombre lo dice, es una medida de la uniformidad de las presiones en los nodos de una red. De este modo se calculan dos criterios que eventualmente puedan contribuir a la tarea de asignar prioridades de renovación a los tubos de una red. Se trata de una metodología desarrollada en un trabajo de maestría de la Universidad de los Andes y ampliamente divulgada en internet, sobre la que se hacen algunas variantes, conservando sus ideas y principios.

Se desarrolla una aplicación en Visual Basic para Aplicaciones (VBA) de Microsoft Excel, utilizando el toolkit de Epanet como herramienta de simulación y edición de los modelos de las redes. Se aplica la metodología a modelos hidráulicos hipotéticos y sobre un modelo real y se analizan los resultados.

^I Trabajo de grado. Ingeniería civil.

^{II} Facultad de ingenierías físicas y mecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director: M Eng. Luis Fernando Castañeda Galvis.

ABSTRACT

TÍTULO:

OPTIMIZATION OF RESILIENCE INDEX AND PRESSURE UNIFORMITY AS CRITERIA TO RENEWAL PIPELINES IN WATER DISTRIBUTION NETWORKS^I

AUTHOR:

SERGIO ANDRÉS TORRES MARTÍNEZ^{II}

PALABRAS CLAVES:

Water distribution networks, resilience index, pressure of water distribution networks, pipelines renewal, leakages, Epanet toolkit.

DESCRIPCIÓN:

To Determine priority of replacement a pipe in water distribution network, into preventive maintenance program; is usually considered as first criterion to probability of failure. Would be desirable then, consider more criteria to add support and complement to assignment of priorities replacement and thus set a more integral renovation program.

In this work program and apply a methodology that seeks improve the hydraulic reliability and mitigate water leaks throughout network. To achieve this is used an optimum improvement of two hydraulic performance indicators: The resilience index and uniformity pressure coefficient; through increased diameter of the pipe networks. It is also considered reduction pressure at the inlet of network as a further restriction. Resilience index is a measure of hydraulic reliability and the uniformity pressure coefficient, as its name implies, is a measure of pressure uniformity at the nodes of a network. Thus two criteria are calculated which may eventually help to the task of assigning priorities to renewal pipes in a network. It is a methodology developed in a master's work at the University of the Andes and widely disseminated on the internet, on which are made some variations, keeping his ideas and principles.

An application is developed in Visual Basic for Applications (VBA) from Microsoft Excel, using the Epanet toolkit as simulation and edition tool of network models. Methodology is applied to hypothetical hydraulic models and real model and results are analyzed.

^I Work Degree. Civil Engineering

^{II} Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Civil Engineering School. Director: M Eng. Luis Fernando Castañeda Galvis

1 INTRODUCCIÓN

El mejoramiento de las redes de distribución de agua potable es una práctica asociada a la solución de varios problemas. Infraestructuras deterioradas en sistemas de distribución de agua pueden provocar pérdidas por fugas, disminución de la capacidad de transporte de agua, fallas en los componentes del sistema (tuberías, bombas, válvulas entre otros), elevación en los costos de mantenimiento y operación, deficiencia en la calidad del fluido, constantes interrupciones en el servicio y disminución de la confiabilidad. Esos factores demuestran que la mejoría de esas infraestructuras, a pesar de ser necesaria, no es tarea fácil pues los objetivos son múltiples y en buena parte conflictivos. En cuanto un esfuerzo considerable ha sido empleado durante las últimas décadas en el desarrollo de proyectos óptimos y eficientes, la problemática de la mejoría óptima de redes hidráulicas existentes ha recibido menor atención. Se puede afirmar que el mejoramiento óptimo de sistemas de distribución de agua existentes es un problema complejo, pues fuera de envolver muchas variables, considera varias opciones (duplicación, renovación, limpieza, eliminación, reparación, adecuación o adición de componentes) que pueden ser implementadas en los sistemas como alternativas de mejoría de los mismos.

La renovación de tuberías como alternativa de mejoría, es típicamente adoptada para mejorar la integridad física de las tuberías, priorizando la reposición con base al criterio de probabilidad de fallo. Sin embargo, el reemplazo puede también ser acompañado con incrementos en el diámetro y de esta forma producir grandes mejoras en el desempeño hidráulico de la red, y por lo tanto es una alternativa útil cuando la carga sobre la red o el deterioro del desempeño, son significativamente mayores que los niveles esperados. De este modo es deseable tener en lista otros objetivos que contribuyan a la elaboración de un plan de renovación más integral.

Muchos de los objetivos que se buscan optimizar en un programa de mejora de redes, necesitan de la simulación hidráulica de toda la red para ser valorados con más precisión y/o rapidez. Formulando objetivos prometedores, utilizando la simulación hidráulica y métodos clásicos de optimización, diversas metodologías de mejoramiento vienen siendo propuestas en la literatura para **auxiliar** en la decisión de elegir las mejores opciones de a ser adoptadas en un sistema. En este sentido, este trabajo busca aplicar una de tales metodologías de auxilio de decisión. La metodología está basada en un trabajo de maestría propuesto por Araque, D. (2006) [2] de la Universidad de los Andes. Se busca de manera óptima, mejorar la confiabilidad hidráulica y mitigar las fugas en una red de distribución; por medio de la optimización de dos objetivos: El índice de resiliencia (I_r) (Todini, E. 2000 [15]) y el coeficiente de uniformidad de presiones (CU) (Araque, D. 2006 [2]); utilizando el aumento del diámetro de algunas tuberías y la reducción de la presión a la entrada de una red. El índice de resiliencia de la red es una medida asociada a la confiabilidad hidráulica de las redes y el coeficiente de uniformidad de presiones es una medida asociada a la magnitud de las fugas. Para materializar la metodología se escribe un algoritmo en VBA (Visual Basic para aplicaciones) de Microsoft Excel, que usa la biblioteca de enlace dinámico epanet2.dll¹. Se aplica la metodología a tres redes, una de las cuales corresponde al distrito Morro Bajo del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga AMB S.A E.S.P y se analizan los resultados.

¹ "The Epanet Programmer's toolkit". Es una biblioteca de enlace dinámico (DLL) que contiene funciones que ejecutan las más importantes tareas de Epanet.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Aplicar una metodología de mejora óptima del desempeño hidráulico de redes mediante el aumento de diámetros de tuberías, donde se priorice los cambios de aquellas tuberías que más contribuyan a optimizar el índice de resiliencia (Ir), optimizar la uniformidad de las presiones (CU), u optimizar conjuntamente el índice de resiliencia y la uniformidad de presiones.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir la metodología de mejora óptima del desempeño hidráulico, con base a modificaciones hechas a la propuesta de Araque, D. (2006) [2].
- Desarrollar una aplicación en VBA (Visual Basic para Aplicaciones) de Microsoft Excel usando la biblioteca Epanet2.dll; para materializar la metodología.
- Aplicar la metodología de renovación a una red piloto.
- Analizar y comparar los resultados de la aplicación de la metodología a la red piloto.

3 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

3.1 MEJORAMIENTO ÓPTIMO DE REDES: IDEAS GENERALES

En cuanto las demandas crecen con el tiempo, el desempeño de las redes de distribución de agua decrece debido a factores internos o externos. Los factores internos están vinculados al deterioro de las superficies internas de las tuberías, resultando en mayores pérdidas por fricción, degradación de la calidad del agua y reducción de la confiabilidad del sistema. Los factores externos son provenientes del deterioro estructural de las tuberías, relacionado fuertemente con las altas tensiones mecánicas impuestas sobre el sistema, bien sea por la naturaleza o por el mismo funcionamiento; resultando en el surgimiento de fugas, y con éstas las pérdidas económicas, y el desperdicio del recurso hídrico potabilizado. Aun sin necesidad de esperar el paso notable del tiempo, los sistemas no planificados correctamente pueden sufrir de esos reconocidos problemas.

Infraestructuras deterioradas o mal planificadas pueden entonces provocar pérdidas por fugas, disminución de la capacidad de transporte de agua, fallas en los componentes del sistema (tuberías, bombas, válvulas entre otros), elevación en los costos de mantenimiento y operación, deficiencia en la calidad del fluido, constantes interrupciones en el servicio y disminución de la confiabilidad.

Esos factores demuestran que la mejoría de esas infraestructuras, a pesar de ser necesaria, no es tarea fácil pues los objetivos son múltiples y en buena parte conflictivos. Cuando el mejoramiento de redes hidráulicas se piensa a través de la optimización de un objetivo único, la solución encontrada no atenderá los otros objetivos implícitos en el problema. Ese tipo de optimización es útil en el sentido de proporcionar a los decisores, informaciones preliminares sobre la naturaleza del problema, más no ofrece soluciones alternativas que relacionen los objetivos. Por ejemplo, optimizar la confiabilidad tiende a presentar soluciones con mayores

diámetros, y consecuentemente presiones elevadas en el sistema. Obsérvese que esa maximización es conflictiva con la minimización de fugas, que prioriza soluciones con presiones más bajas. Para un decisor es interesante que varias soluciones estén disponibles, para así conducir a una escogencia más adecuada. Hay una tendencia en la literatura en sustituir la optimización convencional mono objetivo por la optimización multiobjetivo, para hacer mejoras a las redes.

Ante un caso de no conocimiento integral del problema, una alternativa ideal a primera vista sería mejorar la integridad física de la red rehabilitando y/o mejorando todos los componentes deteriorados de un sistema existente, entretanto, esto no es factible desde el punto de vista económico, pues los recursos financieros disponibles son limitados e insuficientes para contemplar todo el sistema. Así, la elección de la mejor alternativa de mejora no es una tarea simple, pues envuelve decisiones que consideran no sólo aspectos económicos y físicos, sino también el efecto de la misma en el desempeño hidráulico y la calidad del agua del sistema.

El objetivo de la optimización multiobjetivo aplicada al problema en cuestión del mejoramiento de redes, es encontrar la forma óptima de inversión que eleve la eficiencia de los sistemas a través de modificaciones aplicadas a las redes. Esas modificaciones buscan una elevación del desempeño hidráulico de la red (renovación, limpieza, duplicación o revestimiento de tuberías existentes; adición, adecuación o renovación de componentes como válvulas, bombas y depósitos), el aumento de la integridad física (sustitución de tuberías propensas a fallas), el aumento en la flexibilidad del sistema (adición de tuberías en paralelo) y la mejoría en la calidad del agua (limpieza y revestimiento de tuberías, adición de estaciones de cloración, programación óptima de la dosificación de cloro).

Así, cada metodología que se propone para el mejoramiento óptimo de redes se distingue por buscar unos objetivos particulares con base en la necesidad y/o importancia, emplear unas opciones particulares de mejoría con base en el

análisis y la comprensión del problema, además de una particular técnica de optimización. ***Vista desde esta perspectiva***, la metodología que se aplica en el presente trabajo tiene como objetivos: Mitigar las fugas y aumentar la confiabilidad hidráulica. Se justifica el primer objetivo con base en los grandes beneficios que esto le genera a las empresas prestadoras del servicio y al entorno que rodea las tuberías. Matemáticamente se plantea mediante la optimización del coeficiente de uniformidad de presiones (CU) de ARAQUE & SALDARRIAGA (2006) [2], y una restricción de mantener una presión mínima igual a la reglamentaria permitida (secciones 3.3, 3.4 Y 5.1.2). El segundo objetivo se justifica con base en la importancia de reducir el perjuicio que sufren los usuarios (interrupción del servicio o poca presión) cuando crece la demanda, se inhabilitan tuberías o fallan tuberías. Matemáticamente se plantea mediante la optimización del índice de resiliencia de Todini, E. (2000), (sección 3.2 Y 5.1.1). La opción de mejoría es el aumento de diámetros de tuberías, conociendo que es un parámetro bastante influyente en las pérdidas por fricción. Como método de optimización multiobjetivo se emplea el método de la suma ponderada exponencial de ATHAN & PAPALAMBROS, (1996) [3] (sección 3.6.2).

Una clasificación interesante de las metodologías de mejoramiento de redes, es la que se encuentra en el trabajo de CHEUNG, P.B (2004) [4]. Según éste, las metodologías de mejoramiento de redes de distribución de agua pueden ser clasificadas en dos tipos, el primer tipo busca rehabilitar o mejorar componentes individuales de la red sin preocuparse por el análisis hidráulico del sistema y es basado en técnicas estadísticas. En el segundo tipo se busca identificar los componentes de la red que deben ser mejorados considerando la evaluación hidráulica del sistema y son basados en técnicas de análisis de sistemas. Las metodologías pertenecientes al segundo tipo vienen siendo extensivamente investigadas en la literatura a lo largo de los años y se ayudan con herramientas de simulación hidráulica.

Las metodologías del primer tipo o estadísticas identifican los componentes a rehabilitar sin considerar los efectos globales causados en la red derivados de los cambios. La mayoría de esas metodologías usa como información el ciclo de vida de los componentes y los datos históricos disponibles referentes a las reparaciones del sistema, de este modo evalúan la necesidad de mejoramiento de un componente en función de la estimación de la tasa o probabilidad de daño. Con el surgimiento de teorías eficientes para el análisis de redes, el avance computacional tanto en programas para análisis de redes como en equipos, las técnicas de análisis de sistemas comenzaron a ser aplicadas a la planeación de sistemas de distribución de agua, específicamente, hacia el proyecto óptimo de los mismos.

Al contrario de las técnicas estadísticas usadas en las metodologías del primer tipo, las técnicas basadas en análisis de sistemas evalúan las diversas alternativas a través de simulaciones hidráulicas (evalúan el desempeño global). Muchos de los objetivos que se buscan optimizar en un programa de mejoramiento óptimo, necesitan de la simulación hidráulica de toda la red para ser valorados con más precisión y/o rapidez, así entonces, las metodologías del segundo tipo están en capacidad de abordar la búsqueda de aquellos objetivos. Utilizando éstas últimas técnicas y métodos clásicos de optimización, diversas metodologías de mejora óptima vienen siendo propuestas en la literatura para auxiliar en la decisión de elegir las mejores opciones a ser adoptadas en un sistema. *En este sentido, este trabajo busca aplicar una de tales metodologías de auxilio de decisión.*

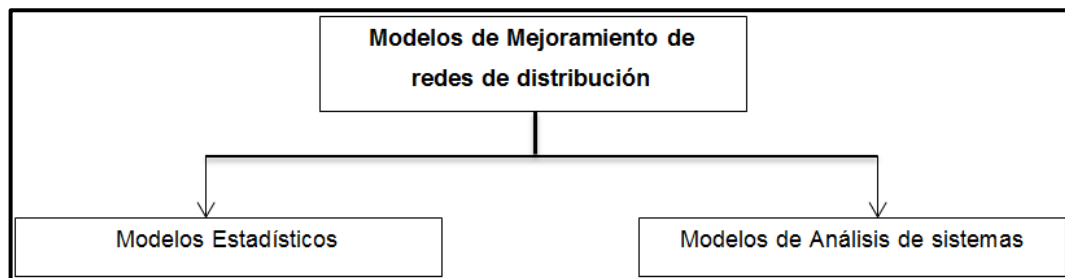


Figura 1. Clasificación de los modelos de mejoramiento de Redes. Adaptado de CHEUNG, P.B. [4]

Es importante anotar sin embargo, que lo ideal es que los dos tipos de metodologías se complementen entre sí y que el uso de un tipo no excluya el uso del otro. Basta pensar por ejemplo, en pretender renovar tuberías deterioradas en base a un análisis estadístico. Sería bueno aprovechar para evaluar que tan beneficioso resulta un cambio de diámetro en el desempeño hidráulico global de la red.

Las empresas encargadas del abastecimiento de agua potable en general adoptan en mayor o menor grado, políticas de mantenimiento proactivo y reactivo. La adopción de una u otra política es, sin duda, una prueba fehaciente del grado de evolución gerencial que alcanza una empresa de aguas.

3.2 CONFIABILIDAD HIDRÁULICA DE LAS REDES

3.2.1 Definición

No hay una definición única, acabada y precisa sobre el concepto de confiabilidad hidráulica. Pero las interpretaciones que se le han dado al concepto se mueven dentro de una idea general: “La fortaleza de una red para mantener un nivel de servicio adecuado (en términos de disponibilidad de caudal y presión) frente a eventos adversos”, como aumentos drásticos de la demanda, rotura o cierre de tuberías, paradas en las bombas, rotura de válvulas, fugas en la red, aumento de la rugosidad de las tuberías, entre otros. De las interpretaciones que se han dado al concepto se citan por ejemplo las siguientes:

Alperovits & Shamir, (1977) estuvieron de acuerdo en que la confiabilidad de las redes de distribución está relacionada con la redundancia de rutas por las que el fluido pueda llegar a los nodos de consumo y que esto implicaba mantener una configuración mallada de las redes. Tung, (1985) define la confiabilidad de los sistemas de distribución de agua como la probabilidad de que el flujo alcance a los

puntos de demanda en la red. Ormsbee & Kessler (1990) definen la redundancia como medida de la confiabilidad y a su vez definen dos tipos de redundancia, topológica e hidráulica. La redundancia topológica asegura la existencia de más de un camino de la fuente al nudo de consumo. La redundancia hidráulica asegura la capacidad de transportar el fluido por un camino redundante alternativo, abasteciendo una presión adecuada a los nudos para condiciones de cargas específicas.

Para Xu et al. (1999) la confiabilidad de la red, es medida por su capacidad de asegurar la demanda de los nudos a una presión mínima requerida. Para Walski y Gessler (1999), la confiabilidad de la red depende de la sobrepresión disponible para los nudos de consumo. Bertin (1994) describe la confiabilidad de la red con la ayuda de un índice, que expresa el impacto de un fallo sobre la satisfacción de la demanda a nivel de los nudos de la red.

Se puede evidenciar, no sólo con las anteriores interpretaciones, que la confiabilidad se asocia fuertemente a dos aspectos que deben coexistir, redundancia de caminos (redes malladas) y suficiencia de presión. De este modo, bajo el escenario de la interrupción de tuberías, la redundancia provee caminos alternativos y la suficiencia de presión provee la energía para enfrentar las mayores pérdidas de carga consecuencia de un mayor caudal transportado por las demás tuberías.

3.2.2 Medidas sustitutivas

3.2.2.1 Índice de Resiliencia.

Todini (2000) [15] introdujo el concepto de resiliencia como una medida sustitutiva de confiabilidad de las redes. Está basado en la noción de que las pérdidas de energía interna incrementarán cuando la demanda incremente o cuando ocurran fallos en las tuberías. Por lo tanto es deseable proporcionar más potencia en cada

nodo, de modo que exista un superávit suficiente de potencia para ser disipado internamente en caso de fallos en las tuberías o incrementos en la demanda. De este modo, el índice de resiliencia hace referencia a qué tanto excedente de energía hay en la red. Matemáticamente está dado por la relación entre el superávit de potencia por unidad de peso que es proporcionado a la red y la máxima potencia por unidad de peso que podría ser disipada internamente por la red sin dejar de satisfacer la presión mínima. A continuación la deducción.

A la red distribución se le suministra una potencia por unidad de peso llamada potencia por unidad de peso de entrada (P_{inp}), cuantificada en términos del caudal y presión que suministran las fuentes de energía. En el vocabulario de Epanet dichas fuentes de energía corresponden a los embalses, depósitos (en los instantes en que hacen las veces de embalse), y las bombas.

$$P_{inp} = \sum_{i=1}^{n_e} (Q_e H_e)_i + \sum_{i=1}^{n_{pu}} \frac{P_i}{\gamma}$$

Donde Q_e y H_e son el caudal y la altura piezométrica suministrada por el embalse i respectivamente, n_e es el número de embalses, P_i es la potencia suministrada por la bomba i y n_{pu} es el número de bombas en la red. La potencia que suministra una bomba i en términos de caudal y cabeza piezométrica dada es $P_i = \gamma h_i Q_i$

En cada nodo de consumo de la red se entrega una potencia por unidad de peso, y la suma de ésta a través de todos los nodos es llamada potencia por unidad de peso de salida (P_{out}). De esta potencia se consideran dos tipos, (i) Una potencia por unidad de peso de salida mínima (P_{out}^{min}), correspondiente a una presión mínima en los todos nodos de consumo, y (ii) una potencia por unidad de peso de salida real (P_{out}^{real}), correspondiente a la presión real existente en los nodos. De este modo:

$$P_{out}^{min} = \sum_{j=1}^{n_n} Q_j H_j^*$$

$$P_{out}^{real} = \sum_{j=1}^{n_n} Q_j H_j$$

Donde Q_j es el caudal suministrado al nodo j , H_j^* la altura piezométrica mínima para el nodo j y H_j la altura piezométrica real presente en el nodo j .

En su paso por la red de distribución el fluido pierde energía o equivalentemente la red consume potencia. Esa potencia que consume la red es llamada potencia por unidad de peso de operación del sistema (P_{int}). La presencia de fugas en la red de distribución en forma de orificios aumenta la potencia por unidad de peso de operación del sistema.

Dicho lo anterior, la potencia por unidad de peso de entrada (P_{inp}) debe ser igual a la suma de la potencia por unidad de peso de operación (P_{int}) y la potencia por unidad de peso de salida (P_{out})

$$P_{inp} = P_{int} + P_{out}$$

Y entonces

$$P_{int} = P_{inp} - P_{out}$$

Como se mencionó anteriormente, hay dos tipos de potencia por unidad de peso de salida (mínima y real), en consecuencia se definen dos tipos de potencias por unidad de peso de operación, máxima y real.

$$P_{int}^{max} = P_{inp} - P_{out}^{min}$$

$$P_{int}^{real} = P_{inp} - P_{out}^{real}$$

Así, P_{int}^{real} representa la potencia por unidad de peso que realmente consume la red y P_{int}^{max} representa la máxima potencia por unidad de peso que podría ser consumida internamente por la red sin dejar de satisfacer la presión mínima en todos los nodos de consumo. La ecuación que define el índice de resiliencia es,

$$I_R = 1 - \frac{P_{int}^{real}}{P_{int}^{max}}$$

Las redes más resilientes son aquellas que presentan un menor valor de la relación $P_{int}^{real}/P_{int}^{max}$ y por lo tanto tienden a 1 en el valor del índice de resiliencia. Esto significa que para aumentar el índice de resiliencia se debe reducir el término P_{int}^{real} , cuya ecuación a su vez implica que se debe afectar uno o ambos de los siguientes términos: P_{inp} y P_{out}^{real} . Al sustituir los valores P_{int}^{real} y P_{int}^{max} se encuentra la expresión general para el índice de resiliencia

$$I_R = \frac{\sum_{j=1}^{n_n} Q_j (H_j - H_j^*)}{\left[\sum_{i=1}^{n_e} (Q_e H_e)_i + \sum_{i=1}^{n_{pu}} \frac{P_i}{\gamma} \right] - \sum_{j=1}^{n_n} Q_j H_j^*}$$

Para determinar el I_r se deben tener en cuenta las fugas en el sistema. Bajo ambiente de fugas la formulación es:

$$I_R = \frac{\sum_{j=1}^{n_n} (Q_j + Q_{f,j}) (H_j - H_j^*)}{\left[\sum_{i=1}^{n_e} (Q_e H_e)_i + \sum_{i=1}^{n_{pu}} \frac{P_i}{\gamma} \right] - \sum_{j=1}^{n_n} (Q_j + Q_{f,j}) H_j^*}$$

Donde $Q_{f,j}$ es el caudal de fuga en el nodo j.

El índice de resiliencia es una medida muy apropiada para medir la confiabilidad hidráulica de las redes según Todini E (2000) [15], principalmente por la facilidad computacional que el mismo ofrece.

3.2.2.2 Resiliencia de la red

Prasad & Park. (2004) [9] extienden el concepto de resiliencia considerando que además del superávit de potencia, la redundancia de la red y la uniformidad de las conexiones representan redes más confiables y proponen esta nueva medida para valorar la uniformidad de las conexiones. La ecuación que define la resiliencia de la red es,

$$I_n = \frac{\sum_{j=1}^{n_n} U_i Q_j (H_j - H_j^*)}{\left[\sum_{i=1}^{n_e} (Q_e H_e)_i + \sum_{i=1}^{n_e} \frac{P_i}{\gamma} \right] - \sum_{j=1}^{n_n} Q_j H_j^*}$$

Donde

$$U_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_p^i} d_j}{n_p^i * \max \{d_1, d_2, \dots, d_{n_p^i}\}}$$

U_i es llamado “coeficiente de conectividad”, n_p^i es el número de tuberías que llegan al nodo i , d_j el diámetro de la j -ésima de tales tuberías. Este coeficiente mide qué tanta uniformidad en tamaños de diámetro hay en un nodo. Obsérvese que corresponde a la misma ecuación del índice de resiliencia pero con la inclusión del coeficiente de conectividad.

3.2.2.3 Potencia unitaria de una tubería

SALDARRIAGA et al (2010) [12] definen la potencia unitaria de una tubería (P_{UT}):

$$P_{UT} = q_{ij}(h_i - h_j)$$

Donde q_{ij} es el caudal que fluye por la tubería del nodo i al nodo j , h_i y h_j las presiones de los nodos i y j respectivamente. Corresponde a la potencia por unidad de peso que pierde el fluido cuando cruza la tubería desde el inicio hasta el final. Obviamente se asocia a las pérdidas por fricción.

3.2.2.4 Superávit mínimo de Energía

Xu & Goulter. (1999) definen esta medida de confiabilidad.

$$I_m = \min\{h_j - h_j^*\} \quad j = 1, 2, \dots, n_n$$

Siendo I_m el superávit mínimo de energía, h_j y h_j^* las presiones real y mínima requerida respectivamente para el nodo j , n_n el número de nodos. Cada $h_j - h_j^*$ indica el excedente de energía en el nodo j (superávit de energía).

3.2.2.5 Superávit total de energía

$$I_t = \sum_{j=1}^{n_n} (H_j - H_j^*)$$

Este superávit indica la energía total excedente en la red. De manera general indica la energía disponible para ser disipada bajo un ambiente de eventos adversos como aumentos de demanda, cierres de tuberías o fallas de las mismas.

3.2.2.6 Confiabilidad Promedio

Con base a que la redundancia generada por el trazado de la red en forma de circuitos permite generar redes más confiables, el CIACUA² propone la medida:

$$CP = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} NRA_i}{n_n}$$

Donde CP es la confiabilidad promedio, NRA_i es el número de rutas de abastecimiento posibles entre el nodo fuente y el nodo i. n_n es el número de nodos. De esta manera CP corresponde al promedio de número de rutas de abastecimiento.

3.3 FUGAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

“Dejar escapar” el agua es un problema para la empresa prestadora del servicio, el usuario y el entorno. La magnitud de dicho “escape” se cuantifica con el índice de agua no contabilizada (IANC),

$$IANC [\%] = \frac{V_{ap} - V_{af}}{V_{ap}} * 100$$

Donde V_{ap} y V_{af} son los volúmenes de agua que la empresa produce y factura, respectivamente. En Colombia el IANC para el año 2008 se estimó en un

² Centro de investigaciones en acueductos y alcantarillados. Universidad de los Andes.

promedio de 45%³, un valor considerablemente superior a la meta regulatoria de 30% establecida por la comisión de regulación de agua potable y saneamiento básico (CRA). En contraste en Estados Unidos y Europa el IANC normalmente está en el rango del 10% al 20%. Como valores promedio en Latinoamérica 42%, Asia 42%, África 39%⁴. En Colombia, del valor del IANC, aproximadamente un 40% es debido a errores de medición, un 35% corresponden a **fugas** y el restante aproximado 25% es debido a conexiones clandestinas, fraudes o robos⁵.

Este trabajo considera sólo las fugas, más específicamente, las fugas presentes en las redes de distribución. Desde la perspectiva del manejo de presiones como estrategia de reducción de fugas la premisa general es, a mayores presiones mayores fugas. Las altas presiones, (i) promueven la generación de orificios y (ii) aumentan el caudal que sale por el orificio ya formado.

La expresión general para el caudal de fuga descargado a la atmósfera a través de un orificio de área A, de pequeñas dimensiones y pared fina es,

$$Q_f = C_d A \sqrt{2gH}$$

Siendo C_d el coeficiente de descarga (adimensional), g la aceleración de la gravedad y H la cabeza piezométrica que actúa sobre el orificio.

ROSSMAN Lewis (2000), el autor de Epanet, sugiere que las fugas en redes de distribución sean modeladas a través de una ecuación de orificio que agrupa los parámetros C_d , A y $\sqrt{2g}$ en un único coeficiente C denominado coeficiente de emisor, para obtener:

³ Informe anual de servicios públicos 2008. Superintendencia de servicios públicos domiciliarios.

⁴ Cifras disponibles en http://whqlibdoc.who.int/publications/2000/9243562029_5_spa.pdf [consultado 15/10/2011]

⁵ Cifras disponibles en http://www.usaambiental.com/pdf/servicios_usa_change.pdf [consultado 16/10/2011]

$$Q_f = CH^a$$

Donde a es llamado exponente del emisor. De esta manera un valor de $a=0.5$ representa una ecuación de orificios que tienen un área de sección constante. En caso contrario representará una ecuación de un orificio que tiene un área variable.

El coeficiente de emisor (C) refleja la dimensión y forma del orificio, y el exponente del emisor (a) refleja la relación de elasticidad entre el área efectiva del orificio y la presión actuante en él. En la literatura se encuentran muchas referencias sugiriendo utilizar un valor de $a=0.5$, sin embargo esa es una aproximación simple que admite un área de sección constante para el orificio. Se asocian valores de $a=0.5$ o al menos cercanos a los materiales más rígidos o menos flexibles, como el hierro, el acero o el asbesto cemento; y valores superiores cercanos a 2.5 para los más flexibles, como los materiales plásticos.

Hoy en día los emisores son fuertemente empleados para la simulación de fugas en las redes de distribución. No obstante, la asignación del coeficiente y exponente a a un nodo de una red con buena exactitud, no es para nada una tarea fácil, pues el coeficiente de emisor de un nodo en una red, está relacionado con el número de fugas (o el área de fugas) por unidad de longitud de tubería, de todas las tuberías que llegan al nodo. Determinar y/o calibrar el coeficiente y el exponente de emisor en los nodos de una red de distribución, es una de las tareas previas base, para posibilitar una estimativa razonable de las fugas con el empleo de emisores.

Según [12] Cuando se renueva una tubería j , el coeficiente de emisor de cada uno de sus dos nodos, disminuye aproximadamente en una fracción L_j/L_T donde L_j es la longitud de la tubería j y L_T la suma de longitudes de todas las tuberías que llegan al nodo en cuestión.

3.4 PLANO ÓPTIMO DE PRESIONES: IDEA GENERAL

El centro de investigaciones en acueductos y alcantarillados (CIACUA) de la Universidad de los Andes, creó el concepto de plano óptimo de presiones y una metodología para su determinación [11]. Se conoce como plano (aunque en realidad es una superficie) de presiones de una red a aquella superficie imaginaria que contiene todos los puntos (x, y, z) tales que z es la presión en el nodo de coordenadas (x, y) de la red. Obviamente para cada instante de tiempo la red refleja un determinado plano de presiones.

Con base en la premisa que los ingresos máximos para las empresas prestadoras del servicio se obtienen cuando se minimizan las pérdidas técnicas de agua (causadas por las fugas no visibles, estallidos y conexiones clandestinas), se define el plano óptimo de presiones como aquel plano de presiones que hace minimizar las pérdidas técnicas, *sin afectar en forma apreciable el volumen total de agua facturado, ni dejar de cumplir los niveles de presión mínima en los nodos, establecidos por las normas.*

Así, el plano óptimo de presiones de una red de distribución se caracteriza en por presentar valores de presión reducidos y uniformes en cada uno de sus sectores, pues de esta forma se minimizan las pérdidas técnicas.

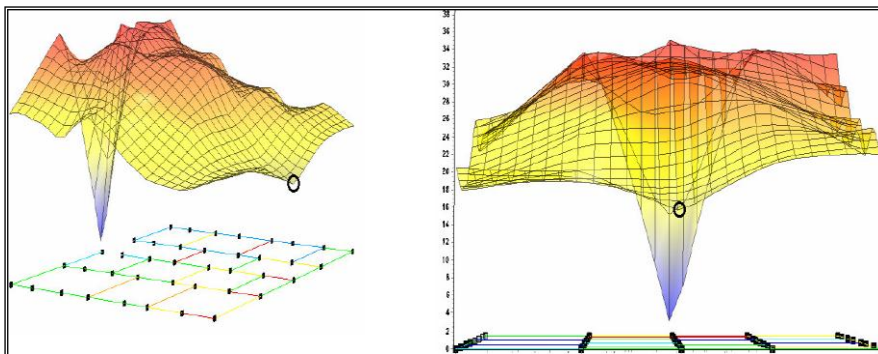


Figura 2. Plano de presiones 1. Fuente: ARAQUE, D. [2]

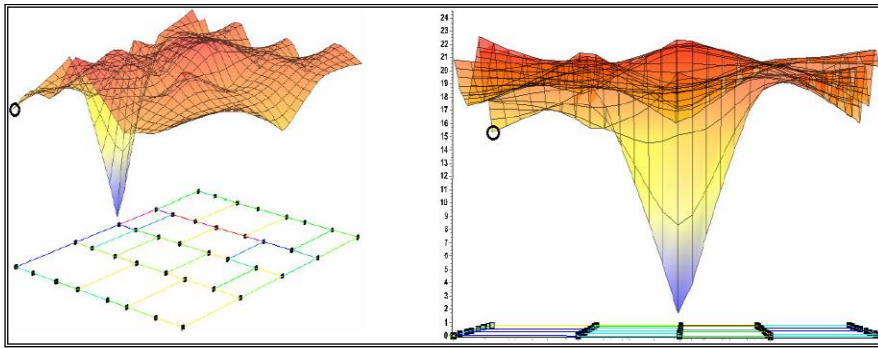


Figura 3. Plano de presiones 2. Fuente: ARAQUE, D. [2]

De acuerdo con lo anterior, la figura 3 muestra un plano de presiones que está más cercano a ser el plano óptimo de presiones de la red en cuestión. Obsérvese que ambas redes aseguran que la mínima presión (círculos negros) coincide con la mínima permitida (15mca). Partiendo de esta consideración, es evidente que la red más uniforme alcanzará una presión promedio más baja y en consecuencia menos fugas, lo que se traduce en una idea más cercana del concepto de plano óptimo. Es así como la uniformidad de las presiones sumada a un bajo valor de la presión promedio, son las características del plano de presiones óptimo.

Con la superficie óptima de presiones se busca llegar a un equilibrio exacto entre la energía de entrada a la red y la energía que realmente se requiere para atender la demanda de todos los suscriptores. Si la energía disponible en las redes es muy pequeña, entonces se presentarán deficiencias en la disponibilidad del servicio, que serán más visibles por aquellos usuarios que se encuentren topográficamente en los sitios más altos y alejados, especialmente durante las horas pico. Por otro lado si la energía disponible es muy alta, se someterá al sistema a presiones de servicio innecesariamente elevadas, de las cuales es sabido que propician la aparición de daños, la disminución de la vida útil de componentes del sistema y el aumento de las fugas.

La metodología para la determinación del plano óptimo de presiones es la columna principal de una serie de metodologías específicas que se deben seguir para obtener los resultados esperados. Determinar el plano óptimo de presiones tiene como objetivo reducir y uniformizar la presión en cada sector en el que está dividida la red de distribución, sin afectar en forma apreciable el volumen facturado (consumo de los usuarios) y garantizando el valor mínimo reglamentario de presión.

3.5 COSTOS Y AHORROS DERIVADOS DE LA RENOVACIÓN DE TUBERÍAS

El costo en el que se incurre cuando se renuevan tuberías, corresponden al costo de adquisición y de implantación. La mayoría de las formulaciones aproximadas de estos costos se presentan como funciones potenciales dependientes del diámetro:

$$C_j = K_{costo} L_j (D_j)^{n_{costo}}$$

Donde C_j es el costo de renovación de una tubería j , L_j y D_j la longitud y diámetro de la misma respectivamente. K_{costo} y n_{costo} son el coeficiente y exponente de costo respectivamente, obtenidos mediante un análisis de regresión hecho a las parejas de valores $(\frac{D_j}{L_j}, C_j)$ que a su vez dependen del contexto donde tiene lugar la renovación. Esto en términos del valor comercial de las tuberías, condiciones y materiales de construcción y mano de obra, principalmente; en el sector donde se han de extraer las antiguas tuberías para implantar las nuevas. Estrictamente hablando, cada sector debería tener una formulación diferente.

Para el método tradicional de renovación con apertura de zanja, el CIACUA⁶ [12] desarrolla la siguiente formulación para el costo de renovación por metro de tubería en redes colombianas:

$$C_j [US \$] = 0.6306 D_j^{0.8946}$$

Donde C_j es el costo de renovación (en dólares de 2007) de la tubería j y D_j es el diámetro de la misma en [mm]. La formulación está hecha para una zanja de 1.2m de profundidad y 0.80 cm de ancho. Llevando esta función de costo a pesos colombianos de 2011 se tiene $C_j [\$] = 1432.643 D_j^{0.8946}$.

ARAQUE & SALDARRIAGA (2006) [2] utilizan la siguiente ecuación para el costo de renovación por metro de tubería:

$$C_j [\$] = 734450 D_j^{1.0138}$$

Donde D_j es el diámetro de la tubería j en [m]. El costo en pesos colombianos de 2002. Para una zanja de 1m de profundidad y 80cm de ancho. En pesos colombianos de 2011 su expresión sería $C_j [\$] = 1158112 D_j^{1.0138}$.

Por otro lado, cuando las tuberías existentes con sustituidas por tuberías nuevas, consideradas libres de fallos, se genera un ahorro en los costos de mantenimiento debido a la mejor condición física de las nuevas tuberías. Dicho ahorro es función del valor presente del costo de reparación de fallos en tuberías. CHEUNG, P. B (2004) [4] llama a este ahorro “beneficio físico” B_f y su expresión es:

$$B_f = \left[\sum_{j=1}^{n_{TR}} C_{rj} \right]_B - \left[\sum_{j=1}^{n_{TR}} C_{rj} \right]_A$$

Siendo n_{TR} el número de tuberías a ser renovadas, C_{rj} el costo de reparación de fallos de la tubería j , B representa la situación sin renovación de tuberías y A

⁶ Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados. Universidad de los Andes.

representa la situación con renovación de tuberías. Según WALSKI (1986), los costos de reparo de fallos pueden ser aproximados por la siguiente ecuación:

$$C_{rj} = \sum_{t=0}^{t=t_r} \frac{N_{rj0}(1+a_j)^t C_{urj}}{(1+r)^t}$$

Donde C_{urj} es el costo de reparación de una ruptura en la tubería j , N_{rj0} el número de reparos en la tubería j en el año cero, a_j la tasa de crecimiento anual de fallos para la tubería j , r la inflación y t_r la duración de la renovación en años.

Otros enfoques optan por utilizar tasas de crecimiento anuales de fallos por kilómetro de tubería, en ausencia de información específica.

JAYARAM, N (2006) sugiere que para el caso de renovación de tuberías se debe tener en cuenta el valor de salvamento de las tuberías que son reemplazadas, dado el caso en que éstas puedan ser reutilizadas. De este modo el valor de salvamento podría ser tratado como un ahorro. En ausencia de información, cualquier modelo de depreciación tal como la depreciación lineal, podría ser utilizado para estimar el valor de salvamento.

3.6 PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO

3.6.1 Generalidades

Muchos problemas de optimización en el mundo real incluyen múltiples objetivos. El proceso de optimizar sistemática y simultáneamente una colección de funciones objetivo es llamado optimización multiobjetivo u optimización vectorial. El problema general de la optimización multiobjetivo es:

$$\begin{aligned} \text{Maximizar } f_z(\vec{x}) \quad & z = 1, 2, \dots, Z \\ \vec{x} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \end{aligned}$$

$$\text{Sujeto a } \begin{cases} g_j(\vec{x}) \geq 0 & j = 1, 2, \dots, J \\ h_k(\vec{x}) = 0 & k = 1, 2, \dots, K \\ x_i^L \leq x_i \leq x_i^U & i = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

Ese es un problema con Z objetivos, n variables de decisión y, $J+K$ restricciones. x_i^L y x_i^U los valores límite para la i -ésima variable de decisión. El conjunto de todas las soluciones \vec{x} que satisfacen las restricciones es llamado conjunto de soluciones factibles X .

Con un problema de optimización multiobjetivo (en adelante MOOP por sus siglas en inglés) no hay necesariamente una solución que sea óptima respecto a todos los objetivos; una solución puede ser mejor para un objetivo pero la peor para otro. Así, la noción más aceptada de “óptimo” en el entorno de los MOOP’s es el concepto de “solución Pareto-óptima”, también llamada solución no dominada, solución eficiente o menos frecuentemente solución admisible. En palabras, una solución es Pareto-óptima si no hay otra solución que mejore al menos un objetivo sin empeorar cualquier otro objetivo. El conjunto de todas las soluciones Pareto-óptimas conforma lo que se conoce como “Conjunto o frontera de Pareto”.

Una clasificación común de los métodos para solucionar MOOP’s los reúne en 3 grupos, primero aquellos que utilizan directamente el *concepto de óptimo de Pareto* para obtener soluciones, segundo aquellos que se basan en la *combinación* de objetivos, y por último aquellos basados en la asignación de *prioridades* a los objetivos. De hecho ésta es la clasificación que se encuentra en Wikipedia-español. Los dos últimos grupos se caracterizan porque ellos abordan sólo optimización(es) mono-objetivo (optimización de un solo objetivo) para simplificar el problema. Así, los métodos basados en la combinación de objetivos lo que hacen es construir una única función objetivo que contiene a todos los objetivos, para posteriormente optimizarla (esta es la técnica que se utiliza en trabajo). De otro lado, los métodos del tercer grupo lo que hacen es optimizar una

sola función objetivo tratando a las restantes como restricciones; esto lo hacen con cada una de las funciones empezando con la que tiene mayor prioridad (importancia).

Según MARLER y ARORA, (2004) [6], quienes hacen un estudio a los métodos de optimización multiobjetivo, se encuentra que no hay un único método que sea consistentemente superior, más bien, la selección de un método específico para solucionar un MOOP depende de la complejidad del problema, del tipo de información que proporciona el problema, de las preferencias del usuario, de los requerimientos para la solución y de la disponibilidad de software. No obstante, los métodos que abordan sólo optimización(es) mono-objetivo son muy populares, tanto así que según MARLER Y ARORA (2004) el método de la suma ponderada lineal, que es un método de combinación de objetivos; es el enfoque más común para solucionar un MOOP. Más aun, los métodos que combinan objetivos requieren menos esfuerzo computacional.

3.6.2 Método de la suma ponderada exponencial.

En el trabajo de MARLER Y ARORA (2004) [6] se sugiere que, aunque no hay respuesta a qué método es mejor, deben preferirse los métodos que proporcionan condiciones necesarias y suficientes para hallar soluciones Pareto-óptimas. Uno de tales métodos que aparecen cumpliendo tales condiciones es el “Método de la suma ponderada exponencial” de ATHAN & PAPALAMBROS (1996) [3], que además presenta una combinación de características deseables. Simplicidad, eficacia, facilidad de programar y bajo costo computacional. El método de la suma ponderada exponencial es un método de combinación de objetivos, de ahí su simplicidad y popularidad. Su formulación es:

$$FO = \sum_{i=1}^Z (e^{p \cdot w_i} - 1) e^{p \cdot f_i(\vec{x})}$$

Donde FO es la función objetivo ponderada, Z es el número de objetivos, f_i representa la función objetivo i , w_i es un factor que debe reflejar el peso o

importancia que tiene el objetivo i entre los demás y p es un parámetro propio del método. Por comodidad ha de cumplirse que $\sum_{i=1}^k w_i = 1$ y $w_i \geq 0$. Por ejemplo para el caso de dos funciones objetivo f_1 y f_2 que se deban minimizar (o maximizar) ambas, asignar $w_1 = w_2 = 0.5$ quiere decir que se da igual importancia a los objetivos. Asignar $w_1 = 0.7$ y $w_2 = 0.3$ puede significar que el objetivo 1 recibe un 70% de importancia frente al 30% de importancia que recibe el objetivo 2. En un problema ideal, cada juego de valores (w_1, w_2) producirá un punto de la frontera de Pareto, pero en los problemas reales eso raramente ocurre y solo se obtienen puntos aproximados a la frontera de Pareto.

Este método es uno de los tantos que se han propuesto en respuesta a los problemas que presenta el popular método de la suma ponderada lineal. El éxito de este método está muy ligado al valor del parámetro p , de modo que grandes valores de p benefician el desempeño del método. Pero en contraposición, grandes valores de p pueden conducir a desbordamiento numérico, en virtud de su condición de exponente. De este modo, ATHAN & PAPALAMBROS (1996) [3] aconsejan normalizar las funciones objetivo antes del uso del método para prevenir dicho inconveniente. En el trabajo de los mismos autores se prueba el desempeño del método de la suma ponderada exponencial usando valores de p hasta de 50.

NORMALIZACIÓN DE FUNCIONES OBJETIVO:

Si las funciones objetivo tienen diferentes unidades y/o los rangos de valores que toman difieren significativamente entre sí, es muy conveniente transformar dichas funciones. Esto es especialmente cierto con los métodos que combinan objetivos en una sola función. Esta operación de transformar las funciones es usada para llevar cada función a unidades adimensionales y a un mismo rango de valores (o por lo menos a un mismo límite superior o inferior). Existen varias maneras de transformar las funciones, la más robusta según MARLER Y ARORA (2004) [6] es esta:

$$f_i^{trans}(x) = \frac{f_i(x) - f_i^0}{f_i^{max} - f_i^0}$$

Comúnmente conocida como normalización. Aquí $f_i^{trans}(x)$ es la función objetivo i transformada (normalizada), $f_i(x)$ la función objetivo original, f_i^0 el mínimo valor que puede tomar la función objetivo i , f_i^{max} el máximo. $x \in$ Espacio de soluciones factibles (sección 3.6.1). $f_i^{trans}(x)$ generalmente toma valores entre 0 y 1 dependiendo de la precisión con que se calculen f_i^0 y f_i^{max} ; si éstos son calculados exactamente entonces se aseguran tales límites 0 y 1. Ahora, calcular f_i^0 y f_i^{max} exactamente, puede ser muy costoso en términos de tiempo de cómputo en problemas donde el espacio de soluciones factibles es “muy grande”, tanto que habrá que tratarse como otro problema de optimización, esta vez mono-objetivo, y aun así obtener un valor aproximado (hágase notar que un problema de optimización es realmente un “problema” cuando no es posible evaluar todas las soluciones factibles, y por lo tanto lo que se buscará son soluciones aproximadas; eso sí, bastante aproximadas). Por lo tanto muchos optan por usar valores aproximados para f_i^0 y f_i^{max} basados en una “intuición ingenieril”.

Cuando no se opta por normalizar las funciones objetivo se favorecen implícitamente aquellas funciones que pueden alcanzar mayores valores.

3.7 EL “TOOLKIT” DE EPANET

Epanet 2.0 es un programa de dominio público desarrollado por la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos para realizar simulaciones hidráulicas y de calidad del agua en periodo extendido, en redes de tuberías presurizadas. Ese paquete computacional es distribuido gratuitamente en dos formas: Ejecutable y código fuente (toolkit)⁷. La forma ejecutable es recomendable para estudios que envuelven simulaciones hidráulicas solamente.

El “kit de herramientas del programador de Epanet”, o simplemente toolkit de Epanet, es la biblioteca de enlace dinámico (DLL)⁸ epanet2.dll que distribuye gratuitamente la EPA. Dicha biblioteca contiene las funciones que ejecutan las más importantes tareas de Epanet, y que pueden ser llamadas o incorporadas en aplicaciones Windows escritas en C/C++, Delphi (Pascal), Visual C++, Visual Basic, o cualquier otro lenguaje de programación que pueda llamar funciones dentro de una DLL. Fue pensado para permitir desarrollar aplicaciones personalizadas que quieran utilizar el motor de cálculo de Epanet.

En palabras del mismo creador de Epanet, Lewis Rossman, epanet2.dll es una colección de funciones llamables externamente que permiten personalizar la manera en que Epanet realiza sus cálculos. Esta biblioteca de funciones permite leer un INP⁹, cambiar y ajustar parámetros, hacer simulaciones múltiples bajo diferentes condiciones (tal como en los problemas de optimización), acceder a los resultados sobre la marcha mientras son computados o guardados al archivo, generar reportes personalizados, etc.

⁷ Disponibles en <<http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/dw/epanet.html>>

⁸ Véase <http://es.wikipedia.org/wiki/Biblioteca_de_enlace_din%C3%A1mico>

⁹ “Un INP” es un archivo con extensión .INP que contiene los datos que describen a una red.

4 ALGUNAS METODOLOGÍAS DE MEJORA ÓPTIMA DE REDES

En la búsqueda de soluciones, los investigadores plantean metodologías que buscan dar mejoría a los grandes objetivos generales del problema multiobjetivo del mejoramiento de redes de distribución: Elevación del desempeño hidráulico de la red, el aumento de la integridad física, la disminución de las fugas y la mejoría en la calidad del agua; por supuesto siempre acompañados de criterios de costo. A manera de ejemplo se citan varias metodologías, distinguiendo sus objetivos, alternativas de mejoría y técnica de optimización.

CHEUNG, P. B (2004) [4] desarrolla un modelo computacional muy completo (integral) de mejoramiento óptimo de redes concebido en tres etapas. La primera etapa comprende los programas necesarios para la calibración de los datos de entrada del modelo, la segunda etapa aplica un algoritmo de optimización multiobjetivo y un simulador hidráulico auxilia las evaluaciones de las funciones objetivo. La tercera etapa muestra las soluciones alternativas para que el usuario decida cual desea tomar. Los objetivos propuestos se basan en un compromiso entre la satisfacción de los consumidores (maximizar el índice de resiliencia, y maximizar la relación *Demanda atendida/Demanda de Referencia*), la protección de los recursos naturales (minimizar las fugas), y la gestión eficiente de los recursos económicos de las compañías (minimizar el costo). Como alternativas a implementar contempla limpieza, duplicación y sustitución de tuberías. Emplea algoritmos genéticos multiobjetivo para la optimización y desarrolla un simulador hidráulico que hace análisis basado en la presión¹⁰ (ADP). Dicho simulador es

¹⁰ Los simuladores hidráulicos convencionales, como Epanet por ejemplo, utilizan una técnica clásica para el análisis de la red, denominada análisis basado en la demanda, en el que las demandas son consideradas fijas y atendidas plenamente. El análisis basado en la presión considera que las demandas no son fijas sino dependientes de la presión disponible. (+ real).

construido con base a la modificación de las funciones de cálculo hidráulico presentes en el toolkit de Epanet.

Todini (2000) [15] presenta una metodología heurística para minimizar el costo (C) y maximizar el índice de resiliencia (Ir) (medida sustitutiva de confiabilidad), mediante el cambio de diámetros de tuberías. Sus ideas han sido extrapoladas a las metodologías de mejoramiento (como las que siguen adelante). Para una solución dada, si no ocurre déficit en la presión de todos sus nodos, se disminuye el diámetro de la tubería que causa el mayor valor de la cantidad $|\Delta C/\Delta Ir|$ (selección voraz). Para ser aceptado el cambio en definitiva, se aplican tres verificaciones, (i) cumplir la restricción de velocidad máxima en todo punto de la red (2 m/s), (ii) El Ir no puede caer por debajo de un objetivo especificado (0.5) y (iii) la presión no puede caer en déficit en ningún nodo de la red. Esta reducción de diámetros continúa iterativamente hasta fallar en una de las verificaciones. De otro lado, dada una solución donde ocurre déficit de presión en algún nodo, se aumenta el diámetro de la tubería que causa el mayor valor de la cantidad $|\Delta Ir/\Delta C|$ (selección voraz). Este incremento de diámetros continúa iterativamente hasta que el Ir esté por encima de un valor objetivo especificado. El enfoque muestra una rápida aproximación hacia soluciones Pareto-óptimas incluso en el caso de grandes tamaños de las redes.

SALDARRIAGA et al. (2008) [14] consideran hacer un análisis de resiliencia a las redes diseñadas con criterio de costo óptimo, con el objetivo de aumentar el índice de resiliencia (Ir) hasta llegar a un umbral mínimo predefinido. Este aumento se hace bajo el escenario de la hora de máxima demanda y caudal de diseño. Este análisis es justificado bajo la consideración de que el diseño con criterio único de costo mínimo, en general produce la red más vulnerable en términos de confiabilidad hidráulica y entonces es factible mejorar el índice de resiliencia (medida sustitutiva de confiabilidad hidráulica). Como opción a implementar contempla el incremento en el diámetro de las tuberías prioritarias que causan el

mayor aumento del índice de resiliencia (selección voraz). Al aplicar esta metodología el diseño puede ser mejorado, buscando una solución más costosa pero con un I_r por encima del umbral mínimo. Se considera el costo derivado de aumentar el diámetro de tuberías. Como herramienta de simulación hidráulica emplean el programa REDES¹¹ desarrollado por el Centro de investigaciones en acueductos y alcantarillados de la Universidad de los Andes, y el algoritmo es implementado dentro del mismo programa.

De manera similar, MENDOZA & SALDARRIAGA (2010) [8] basados también en el hecho que las redes diseñadas con criterio único de costo mínimo no garantizan obtener un nivel de confiabilidad aceptable, proponen una metodología heurística y recursiva con el objetivo de mejorar la confiabilidad hidráulica de una red (diseñada con criterio único de costo) sin incurrir en grandes costos, mediante el incremento en el diámetro de tuberías. Se busca aumentar el índice de resiliencia (medida sustitutiva de confiabilidad hidráulica) hasta que la relación $\Delta I_r(\%)/\Delta C(\%)$ sea menor a 2; donde C es el costo. Esta vez el incremento del índice de resiliencia no se hace directamente mediante el cambio de diámetro de tuberías prioritarias que causan mayor aumento. En vez de eso, es consecuencia de una previa mejoría voraz sucesiva de dos objetivos: Coeficiente de conectividad y relación *Potencia Unitaria/Costo*. Se justifica el mejoramiento del coeficiente de conectividad argumentando que es deseable que las tuberías conectadas a un nodo no varíen ampliamente en diámetro, para hacer más práctica la conexión. La metodología se aplica bajo el escenario de máxima demanda. Se considera el costo derivado de aumentar el diámetro de las tuberías. Como motor de simulación hidráulica se emplea REDES desarrollado por el CIACUA¹². El algoritmo es implementado dentro del mismo programa.

¹¹ Software para el cálculo, análisis y gestión de redes de agua potable. Ambiente Windows. Lenguaje Delphi.

¹² Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados. Universidad de los Andes.

SALDARRIAGA et al. (2008) [13] consideran una metodología de mejoramiento de redes con el objetivo de minimizar la potencia disipada por el sistema (medida de ineficiencia hidráulica) sin incurrir en costos mayores a los beneficios. Como opción o alternativa usa el aumento de diámetro de las tuberías prioritarias que causan la mayor disminución de la potencia disipada (selección voraz). El cambio de tuberías que no produzcan una presión mínima reglamentaria, es rechazado. Como costo se considera el costo de renovación de tuberías y como beneficio cuantificable en dinero se considera el ahorro en el agua que ya no se fuga. Utiliza REDES como simulador hidráulico y el algoritmo es implementado dentro del mismo.

ARAQUE & SALDARRIAGA (2006) [2] desarrollan una metodología de mejoramiento óptimo de redes que es la base de este trabajo, y cuyos objetivos explícitos son minimizar la desviación estándar de las presiones y maximizar índice de resiliencia, sin incurrir en costos mayores a los beneficios ni en deficiencias en la calidad del agua. La uniformidad es una de las características de la superficie óptima de presiones comentada en la sección 3.2. Como técnica de optimización multiobjetivo se usa la suma ponderada lineal de objetivos, que construye una sola función objetivo a partir de la suma ponderada de las funciones objetivo individuales. Como alternativa de mejoría usa el aumento de diámetro de las tuberías prioritarias que causan el mayor incremento de la función objetivo ponderada (selección voraz). El nuevo estado de presiones obtenido en cada paso es ajustado disminuyendo la presión en las entradas de la red de tal forma que la presión mínima coincida con la mínima permitida, con esto se logra disminuir el nivel de presión en la red. Considera el costo de renovación de tuberías. Como beneficio cuantificable en dinero, considera el ahorro en el costo del agua que ya no se fuga. Utiliza REDES como motor de simulación hidráulica y el algoritmo es implementado como un módulo dentro del mismo.

SALDARRIAGA et al. (2010) [12] consideran una metodología de mejoramiento de redes con el objetivo de minimizar la potencia disipada por el sistema (medida de ineficiencia hidráulica) sin incurrir en costos mayores a los beneficios. Como opción o alternativa usa el aumento de diámetro de las tuberías prioritarias que causan la mayor disminución de la potencia disipada (selección voraz). El nuevo estado de presiones obtenido en cada paso es ajustado disminuyendo la presión en las entradas de la red de tal forma que la presión mínima coincida con la mínima permitida, con esto se logra disminuir el nivel de presión en la red. Consideran reducir los coeficientes de emisor cada vez que se encuentre una nueva tubería a renovar. Como costo se considera el costo de renovación de tuberías y como beneficio cuantificable en dinero se considera el ahorro en el agua que ya no se fuga. Utiliza REDES como simulador hidráulico y el algoritmo es implementado dentro del mismo.

5 METODOLOGÍA

5.1 OBJETIVOS

5.1.1 Maximizar el Índice de Resiliencia (In)

$$I_R = \frac{\sum_{j=1}^{n_n} Q_j (H_j - H_j^*)}{\left[\sum_{i=1}^{n_e} (Q_e H_e)_i + \sum_{i=1}^{n_e} \frac{P_i}{\gamma} \right] - \sum_{j=1}^{n_n} Q_j H_j^*}$$

Sin duda alguna, incluir la confiabilidad como uno de los objetivos a mejorar en un programa de mejoramiento de redes, es evidente (secciones 3.2 y 4). La metodología utiliza el índice de resiliencia de la red como medida sustitutiva de la confiabilidad.

La idea de maximizar el índice de resiliencia de la red está adherida al concepto de promover mayor excedente de potencia, ósea promover mayores excedentes de presión. Para lograrlo se puede pensar en (i) Aumentar los diámetros (por ser el parámetro que tiene mayor efecto en las pérdidas por fricción), (ii) Adicionar depósitos y (iii) Adicionar bombas. La metodología usa el aumento del diámetro de tuberías.

5.1.2 Maximizar el coeficiente de uniformidad de presiones (CU)

Como ya se ha dicho en las secciones 3.3 y 3.4, la uniformidad de las presiones está fuertemente ligada a la disminución de las fugas, siempre y cuando vaya acompañada de la reducción en el nivel de presiones; conformando así las características fundamentales del plano óptimo de presiones. Por lo tanto hay razones para que sea tenido en cuenta como un objetivo en el mejoramiento óptimo de redes.

ARAQUE & SALDARRIAGA (2006) [2], proponen el coeficiente de uniformidad de presiones (CU).

$$CU = \frac{\sum_{j=1}^{n_n} P_j}{n_n \max\{P_j\}} = \frac{\bar{P}}{\max\{P_j\}}$$

Donde P_j es la presión en el nodo j , n_n el número de nodos y \bar{P} la presión promedio en los nodos. Se puede ver que,

$$\bar{P} \leq \max\{P_j\} \quad \text{entonces} \quad 0 \leq CU \leq 1$$

Además de esto, es adimensional. Con la consideración del coeficiente de uniformidad como función objetivo, se tienen las dos funciones objetivo (Índice de resiliencia (Ir) y Coeficiente de uniformidad de presiones (CU)) en las mismas unidades y tomando valores en el mismo intervalo (anotando que el índice de resiliencia de la red también toma valores entre 0 y 1). Con esto la normalización

de funciones objetivo se podría eventualmente evitar para ganar tiempo de cómputo, sin que con ello se pueda entrar en el potencial problema de desbordamiento numérico que expone el método de la suma ponderada exponencial, que es el método utilizado en este trabajo (sección 3.6.2).

5.2 FUNCIÓN OBJETIVO

Con el método de la suma ponderada exponencial (sección 3.6.2), la función objetivo a optimizar es:

$$FO = (e^{p \cdot w_1} - 1)e^{p \cdot I_R} + (e^{p \cdot w_2} - 1)e^{p \cdot CU}$$

Donde I_R es el índice de resiliencia de la red, CU el coeficiente de uniformidad de presiones, w_1 el peso o importancia que se da a maximizar I_R , w_2 el peso o importancia que se da a maximizar CU , cumpliendo que $w_1 + w_2 = 1$ y $w_{1,2} \geq 0$ p es el parámetro del método.

Para evitar caer en errores de desbordamiento numérico, el valor máximo que podrá tomar p debe ser aproximadamente 350. Este valor está deducido teniendo en cuenta el tipo de dato numérico que puede albergar mayores cantidades (tipo double) para Visual Basic.

5.3 COSTOS Y BENEFICIOS CONSIDERADOS

Debido a que este trabajo busca ayudar y aportar criterios en la toma de decisiones, no se incluye el costo como criterio de parada del algoritmo, debido a que puede resultar inútil y limitante para quien debe tomar decisiones en las alternativas a implementar. De todas forma se hace una estimación del costo de renovación y el costo del agua fugada.

5.3.1 Ahorro en el costo de agua no contabilizada

El costo del agua no contabilizada en un periodo de tiempo T es,

$$CostoANC(T) = [V_{ap}(T) - V_{af}(T)]K_{agua}$$

Donde $V_{ap}(T)$ y $V_{af}(T)$ son el volumen de agua producida y facturada en el periodo de tiempo T respectivamente y K_{agua} el costo de un metro cúbico de agua. Por lo tanto el ahorro en el agua no contabilizada para un periodo de tiempo T luego de aplicar la reducción de fugas es,

$$AhorroANC(T) = CostoANC(T)_o - CostoANC(T)_A$$

Donde $CostoANC(T)_o$ es el costo en el agua no contabilizada para el periodo de tiempo T, antes de aplicar la reducción de fugas. $CostoANC(T)_A$ es el mismo anterior pero después de aplicar la reducción de fugas.

Si el modelo no tiene asignados y calibrados los valores de coeficiente y exponente de emisores (modelo de fugas) se asigna a todos los nodos un exponente arbitrario de 1.15 y un coeficiente arbitrario de $0.001 LPS/m. c. a^{1.15}$ o su equivalente en otras unidades. La asignación de parámetros de emisores debe ir acompañada de una inspección al valor obtenido en el porcentaje de volumen de agua fugado, respecto al volumen suministrado, para determinar qué tan racional y acorde resulta ser el valor asignado a los parámetros. Por ejemplo, las empresas usualmente reportan el agua no contabilizada como pérdidas comerciales + pérdidas técnicas, así en una red con un porcentaje de pérdidas técnicas del 14%, pues las fugas (que son un componente de dichas pérdidas) tendrían que tomar un valor como mucho igual a ese 14%.

5.3.2 Adquisición e implantación de tuberías

La función general para este costo es: (sección 3.5)

$$C_j = K_{costo} L_j (D_j)^{n_{costo}}$$

Ante ausencia de información se utiliza la función de costo de Gutiérrez, G (2002) [5] traducida a pesos de 2011,

$$C_j[\$] = 1'158112L_jD_j^{1.0138}$$

Donde L_j y D_j son la longitud y el diámetro de la tubería j respectivamente, ambos en metros, para una zanja de 1m de profundidad y 80cm de ancho. Poniendo la misma función de costo en otras unidades se tiene $C_j[\$] = 1052.811 L_j D_j^{1.0138}$ para L_j en metros y D_j en milímetros, o $C_j[\$] = 8522.872 L_j D_j^{1.0138}$ para L_j en pies y D_j en pulgadas.

5.4 RESTRICCIONES

1) El nuevo diámetro de cualquier nueva tubería no puede ser superior al máximo permitido:

$$D_j \leq D_{m\acute{a}x} \quad \forall j$$

2) La presión mínima en la red debe ser igual a la mínima permitida:

$$P_{m\acute{i}n}^{red} \geq P_{m\acute{i}n}$$

La acción combinada de la uniformización y esta restricción contribuyen a la reducción de las fugas.

3) El conjunto de diámetros comerciales a utilizar son, en [mm]: 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600, 750, 800, 1000. En pulgadas se utilizan: 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 24, 30, 32, 40.

5.5 ALGORITMO

A continuación se presenta un pseudocódigo que describe el algoritmo completo:

1) Asignar las variables de entrada.

Figura 4. Formulario para asignar los datos de entrada.

- P_{min} y D_{max} (restricciones a la optimización, presión mínima y diámetro máximo respectivamente)
 - *Rugosidad de las nuevas tuberías a implantar*
 - K_{costo} y n_{costo} (parámetros de la función de costo).
 - C y a (parámetros de emisores).
 - K_{agua} (el costo de entregar un metro cúbico de agua potabilizado).
 - Leer p y w_1 (parámetros del método de optimización).
 - Leer *Numero de Cambios* (número de modificaciones a los diámetros que se desean obtener. Esta variable determina la terminación del algoritmo)
- 2) Hallar la presión mínima que ocurre en la red (P_{min}^{obt}) y su instante correspondiente. Calcular e imprimir I_R y CU en dicho instante.
 - 3) Calcular e imprimir: Costo del agua no contabilizada anual, Rango de Presiones, Presión Promedio en los nodos de consumo, y H_e (altura poiezométrica) del primer embalse.

- 4) Para $e = 1$ hasta Número de embalses:

$$H_e = H_e - (P_{min}^{obt} - P_{min})$$

H_e es la altura piezométrica del embalse e. Esta ecuación ajusta la altura total de cada embalse y de esta manera se aplica la restricción de establecer la presión mínima permitida en el nodo de menor presión encontrado en la red.

- 5) Calcular e imprimir I_R y CU (ambos en el instante de presión mínima). Calcular e imprimir: Costo del agua no contabilizada anual, Rango de Presiones, Presión Promedio en los nodos de consumo, y H_e del primer embalse.

- 6) Para $j = 1$ hasta $j = \text{Número de Tubos}$

Aumentar D_j al siguiente comercial mayor D_j^+

Si $D_j^+ \leq D_{max}$ Ejecute (i), (ii), (iii) y (iv)

(i) Calcular la mínima presión obtenida P_{min}^{obt} en la red.

(ii) Calcular e imprimir I_R y CU (en instante de presión mínima)

(iii) Calcular la función objetivo y llamar a su valor FO_j

(iv) Restablecer el diámetro D_j^+ al que antes tenía, D_j

- 7) Calcular FO^{max} y su correspondiente tubería k que lo produjo.

- 8) Aumentar definitivamente D_k al siguiente comercial mayor D_k^+ . Esto significa una nueva modificación.

- 9) Imprimir los valores I_R y CU derivados del incremento del diámetro de la tubería k.

- 10) Ejecutar 4). En este caso P_{min}^{obt} corresponde a la mínima presión obtenida al incrementar el diámetro de la tubería k. Con esto se disminuye el nivel general de las presiones ocasionado por el aumento del diámetro de la tubería k.

- 11) Calcular e imprimir: Costo del agua no contabilizada anual Rango de Presiones, Presión Promedio en los nodos de consumo, H_e del primer embalse y Costo de Renovación.

- 12) Repetir 6) a 11) hasta que el número de modificaciones efectuadas sea igual al número de cambios establecido.

El paso 4) corresponde al ajuste previo del nivel de presiones para garantizar un valor mínimo de presión igual al mínimo permitido y produce el punto de partida del método de optimización. Así mismo constituye un punto de inflexión en cuanto a las fugas, ya que se puede pasar a menores volúmenes de agua fugada (si la red presenta en principio excesos de presión) o a mayores valores (si la red presenta en principio déficit de presiones).

El método de selección de tubos a modificar, que corresponde a los pasos 6), 7) y 8), obedece a una básica técnica de búsqueda local, conocida como “Ascenso de pendientes más empinadas” o “búsqueda local voraz”, en el que en cada paso el individuo actual es reemplazado por el mejor vecino con el más alto valor de la función objetivo, sólo que aquí no se obliga a que dicho valor sea mejor que el anterior paso. Dichos métodos de búsqueda local voraz son eficientes para ascender rápidamente (o descender lentamente) en el valor de la función objetivo y usados como métodos de selección para priorizar opciones dentro de una búsqueda, como es el caso del problema que aquí se trata.

6 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 RED EJEMPLO 1

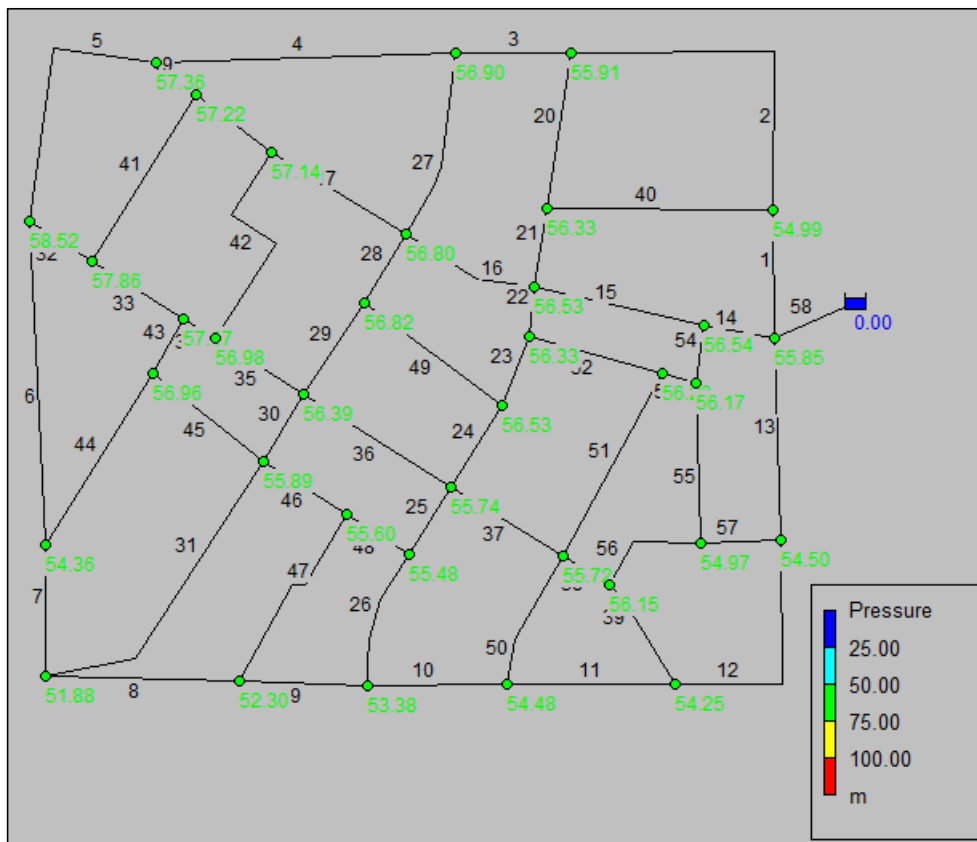


Figura 5. Red ejemplo 1. Presiones en nodos en la hora cero e ID de cada tubo.

Esta red es un ejemplo tomado del sitio web de un grupo de investigación de la Universidad de Bolonia, Italia¹³, asignando una curva de modulación de la demanda de un distrito de Bucaramanga. Es una red con 8.4 [km] de tubería correspondientes a 58 tubos de diámetros entre 60 y 250 [mm], con coeficiente de

¹³ DEIS Operations Research Group. <http://www.or.deis.unibo.it/> - Research - Library of instances - Water Network Design. Consultado Octubre 12 de 2011.

Hazen-Williams de 130 para todos. Un caudal demandado promedio de 0.03417 [m^3/s]. En cuanto a la topografía de los nodos: Cubren 2600 hectáreas en un rango de elevaciones de 6.66 [m], ósea una planicie total. La red no tiene asignados coeficientes de emisor en sus nodos. Los datos de entrada para la aplicación del algoritmo son:

Diámetro máximo del nuevo tubo= 250 [mm]

C de Hazen-Williams del nuevo tubo = 150

Presión mínima = 20 m.c.a

Kcosto = 1052.811 (el que se comenta en la sección 5.3.2)

NCosto = 1.0138 (el que se comenta en la sección 5.3.2)

Parámetros de emisores =. A manera de estimación en la reducción de fugas se asignan los parámetros ($C = 0.00035 \text{ LPS}/m.c.a^{1.15}$; $a = 1.5$)

Costo del agua = $K_{agua} = 500 \text{ \$/m}^3$.

w1 = Se asignan 3 diferentes valores (0.05, 0.5, 0.95), que reflejan importancias baja, media y alta para cada una de las funciones objetivo: Índice de Resiliencia y Coeficiente de Uniformidad

Parámetro p del método = 350 (el máximo posible)

Número de cambios = 25

6.1.1 Resultados

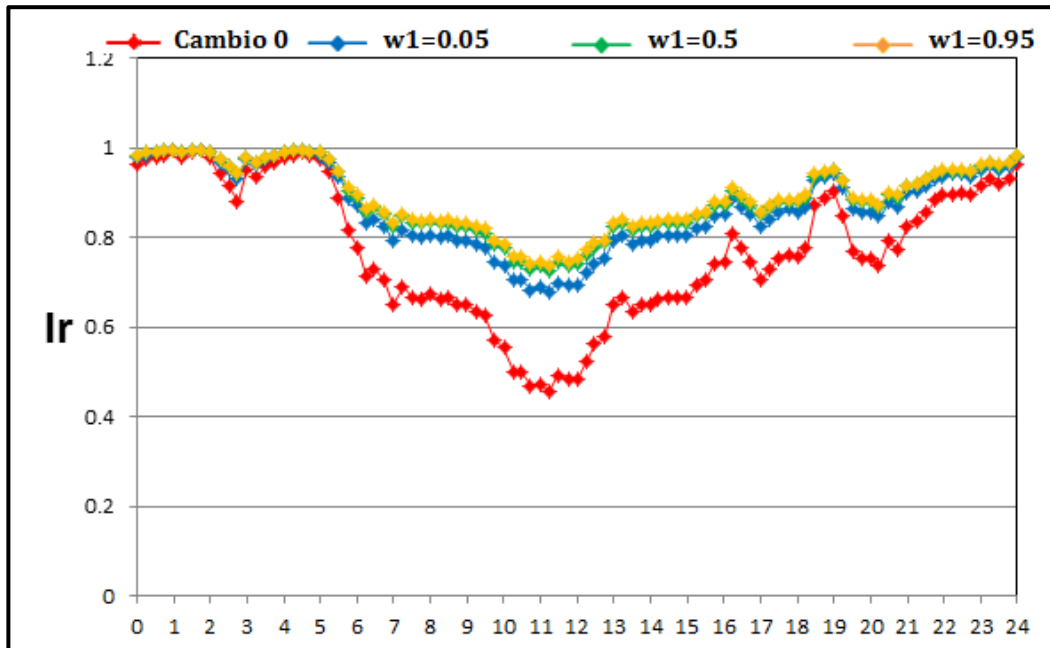


Figura 6. Evolución del Ir a lo largo del día luego de 25 cambios. Red Ejemplo 1.

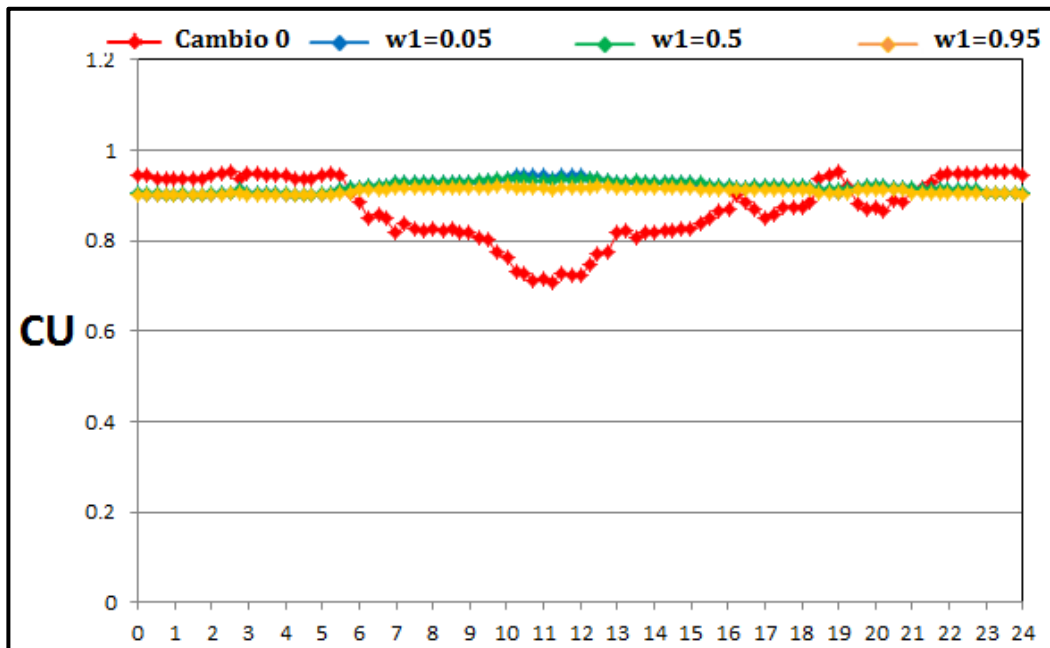


Figura 7. Evolución del CU a lo largo del día luego de 25 cambios. Red Ejemplo 1

Las figuras anteriores y las siguientes muestran que para esta red, y con un máximo de 25 cambios, los objetivos Ir y CU no son conflictivos y por el contrario llevan a los mismos resultados.

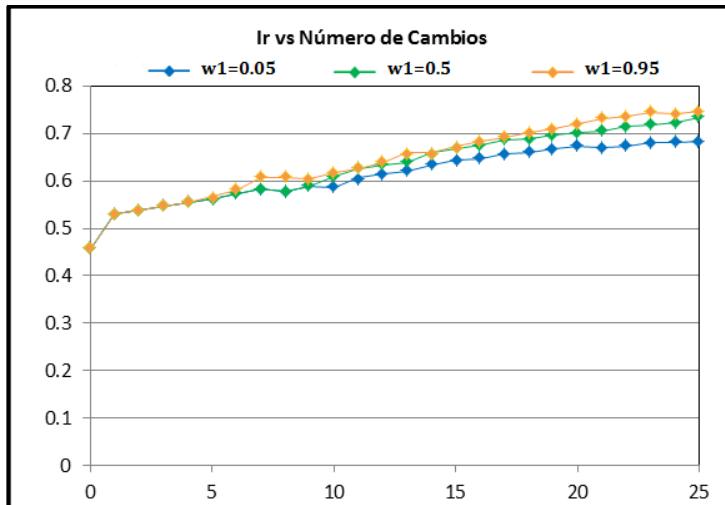


Figura 8. Ir vs Número de cambios. Red Ejemplo 1

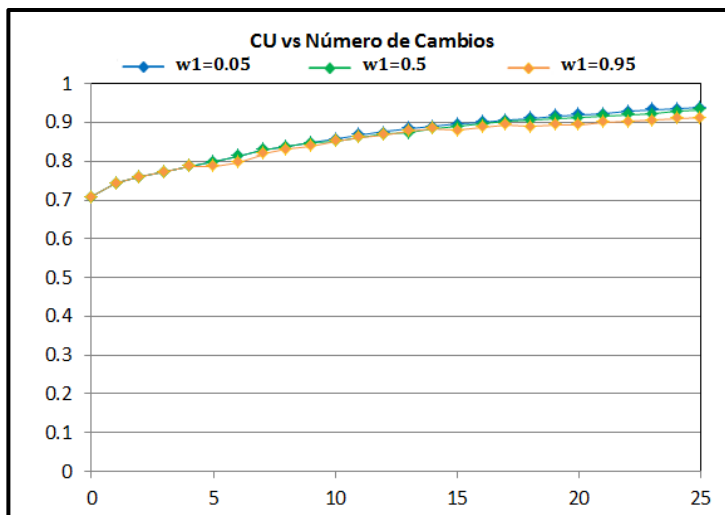


Figura 9. CU vs Número de cambios. Red Ejemplo 1

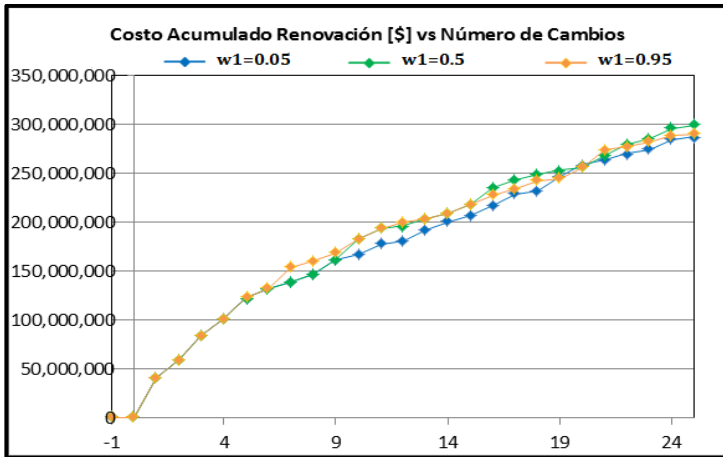


Figura 10. . Costo [\$] de la renovación vs Número de cambios. Red Ejemplo 1

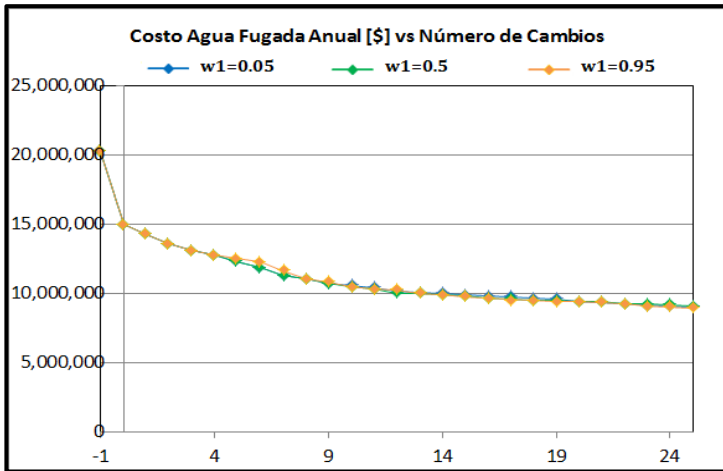


Figura 11. Costo agua Fugada Anual [\$] vs Número de cambios. Red Ejemplo 1

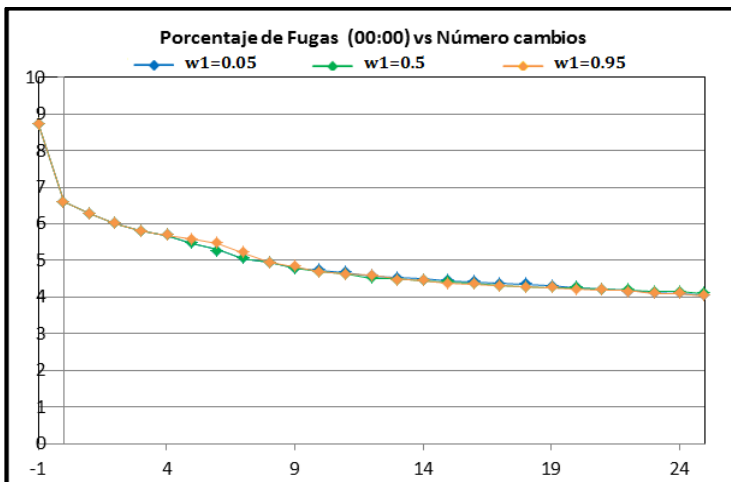


Figura 12. Porcentaje de fugas vs Número de cambios. Red Ejemplo 1

El cambio -1 es la situación inicial sin ningún tipo de cambios. El cambio 0 es el punto de partida del método de optimización después del ajuste inicial de las presiones (véase sección 5.5)

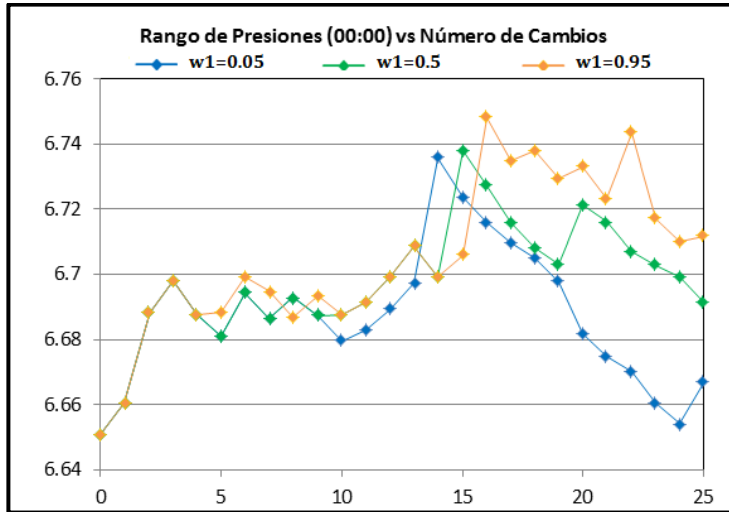


Figura 13. Rango de presiones [mca] vs Número de cambios. Red Ejemplo 1

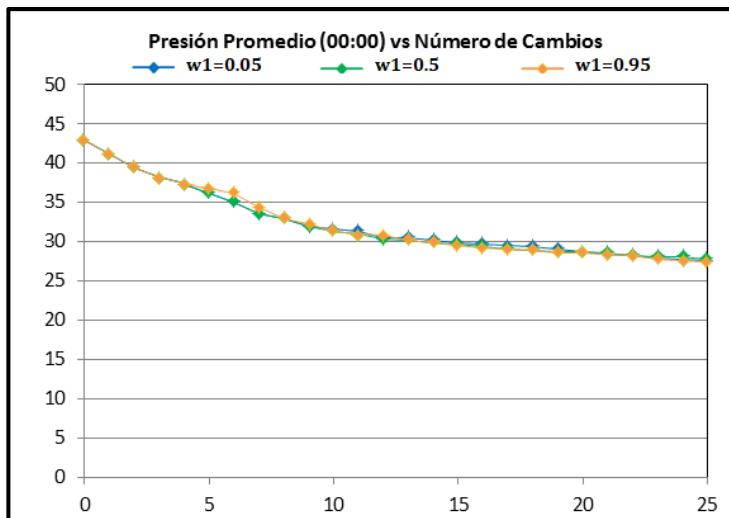


Figura 14. Presión Promedio [mca] vs Número de cambios. Red Ejemplo 1

Se muestra entonces un primer caso donde se logra mejorar la confiabilidad hidráulica (aumento del I_r) y mitigar las fugas.

6.2 RED EJEMPLO 2

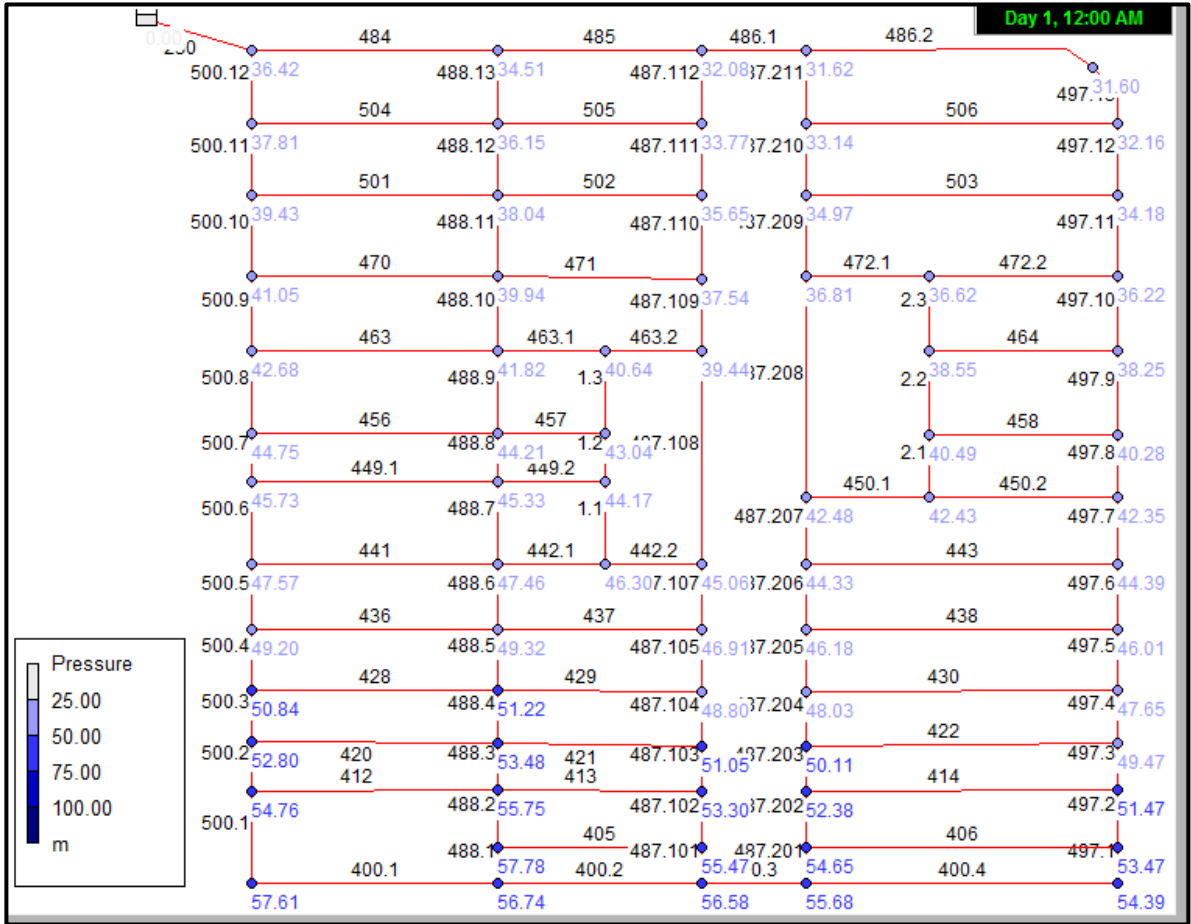


Figura 15. Red ejemplo 2. Presiones en nodos en la hora cero, e ID de cada tubo.

Esta red corresponde a un modelo que se encuentra en el portal web del investigador español Santiago Arnalich¹⁴. Es una red con 14 [km] de tubería correspondientes a 114 tubos de diámetros entre 50 y 300 [mm], con coeficiente de Hazen-Williams de 140 para todos. Un caudal demandado promedio de 0.03621 [m^3/s]. En cuanto a la topografía de los nodos: Cubren 8500 hectáreas en un rango de elevaciones de 26 [m], ósea una planicie total. La red no tiene asignados coeficientes de emisor en sus nodos. Los datos de entrada para la aplicación del algoritmo son:

¹⁴ <<http://www.arnalich.com/w/epanet/descargascasosok.html>> consultado Octubre 11, 2011

Diámetro máximo del nuevo tubo= 500 [mm]

C de Hazen-Williams del nuevo tubo = 150

Presión mínima = 15 mca

Kcosto = 1052.811 (el que se comenta en la sección 5.3.2)

NCosto = 1.0138 (el que se comenta en la sección 5.3.2)

Parámetros de emisores = A manera de estimación en la reducción de fugas se asignan los parámetros ($C = 0.001 \text{ LPS}/m. c. a^{1.15}$; $a = 1.5$)

Costo del agua = $K_{agua} = 360 \text{ \$/m}^3$.

w1 = Se asignan 3 diferentes valores (0.05, 0.5, 0.95), que reflejan importancias baja, media y alta para cada una de las funciones objetivo: Índice de Resiliencia y Coeficiente de Uniformidad

Parámetro p del método = 350 (el máximo posible)

Número de cambios = 30

6.2.1 Resultados

$w_1 = 0.05$			$w_1 = 0.5$			$w_1 = 0.95$		
Cambio	ID Tubo	Nuevo Diámetro	Cambio	ID Tubo	Nuevo Diámetro	Cambio	ID Tubo	Nuevo Diámetro
1	230	250	1	230	250	1	230	250
2	230	300	2	230	300	2	230	300
3	484	250	3	484	250	3	484	250
4	485	250	4	413	75	4	230	350
5	413	75	5	230	350	5	400.4	150
6	230	350	6	485	250	6	484	300
7	413	100	7	413	100	7	485	250
8	413	150	8	413	150	8	230	400
9	400.3	150	9	400.3	150	9	488.13	200
10	484	300	10	484	300	10	487.21	150
11	230	400	11	230	400	11	487.209	150
12	487.21	150	12	487.21	150	12	400.4	200
13	400.4	150	13	487.209	150	13	487.207	150
14	488.13	200	14	485	300	14	484	350
15	487.209	150	15	484	350	15	230	450
16	484	350	16	230	450	16	487.206	150
17	230	450	17	413	200	17	487.205	150
18	487.207	150	18	486.1	250	18	487.204	150
19	400.4	200	19	486.2	250	19	487.203	150
20	487.206	150	20	450.1	75	20	487.202	150
21	488.12	200	21	230	500	21	485	300
22	488.11	200	22	484	400	22	487.201	150
23	487.102	150	23	484	450	23	486.1	250
24	485	300	24	505	200	24	487.21	200
25	488.1	200	25	420	75	25	487.209	200
26	488.9	200	26	500.12	150	26	487.207	200
27	487.101	150	27	497.12	200	27	487.206	200
28	230	500	28	420	100	28	230	500
29	488.13	250	29	500.12	200	29	487.205	200
30	484	400	30	487.21	200	30	487.204	200

Figura 16. Lista de cambios prioritarios para cada valor de w_1 . Red Ejemplo 2

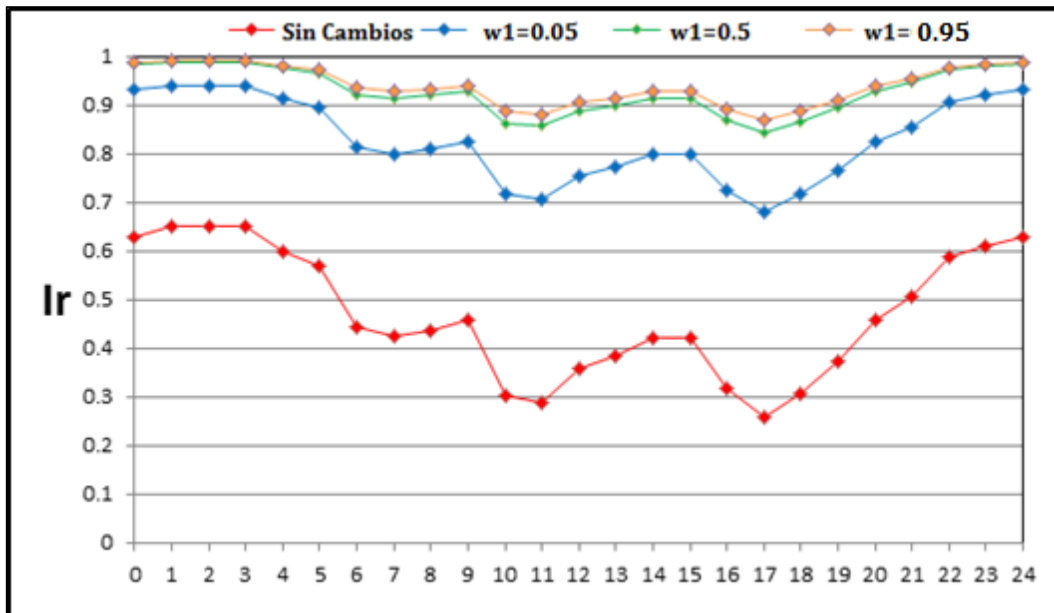


Figura 17 Evolución del Ir a lo largo del día luego de 30 cambios. Red Ejemplo 2

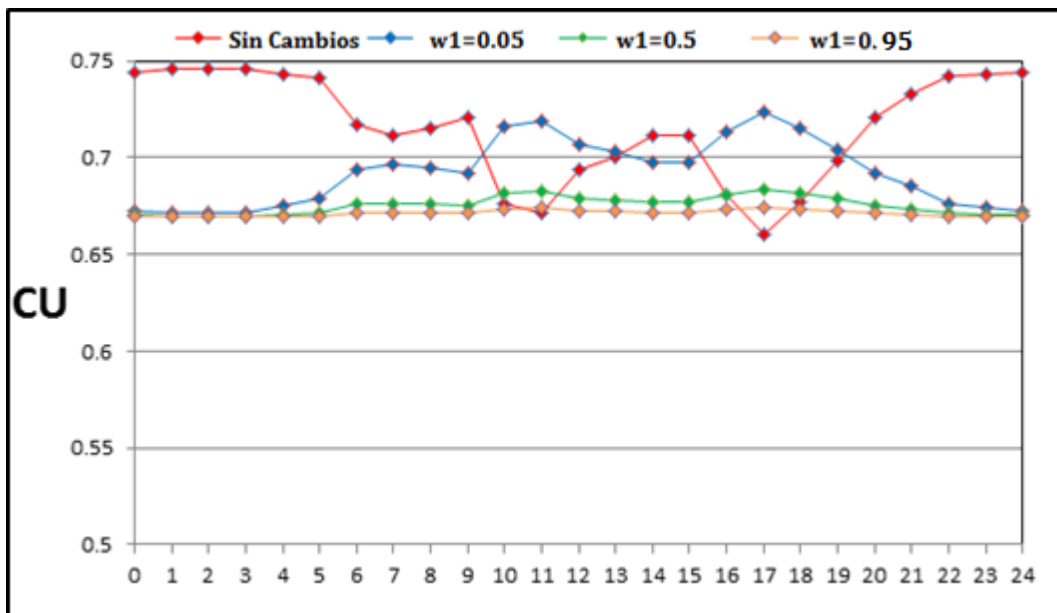


Figura 18. . Evolución del CU a lo largo del día luego de 30 cambios. Red Ejemplo 2

El rango de valores en que se encuentra el CU es mucho menor que el rango en el que se mueve Ir, y con esto la necesidad e importancia de normalizar las funciones objetivo para que la priorización de tubos a renovar dado cualquier w_1 ,

no se vea sesgada a los tubos que mejoren el índice de resiliencia. Las figuras anteriores y las siguientes muestran que para esta red, y con un máximo de 30 cambios, los objetivos Ir y CU prácticamente llevan a los mismos resultados y no entran en conflicto de manera apreciable.

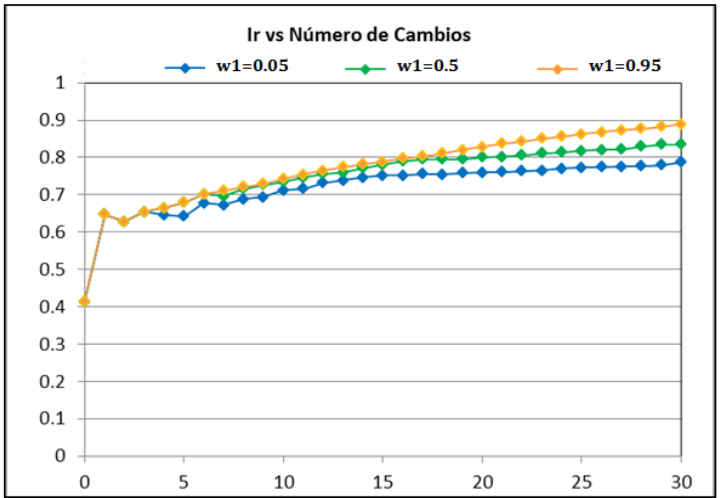


Figura 19. . Ir en instante de mínima presión vs Número de cambios. Red Ejemplo 2

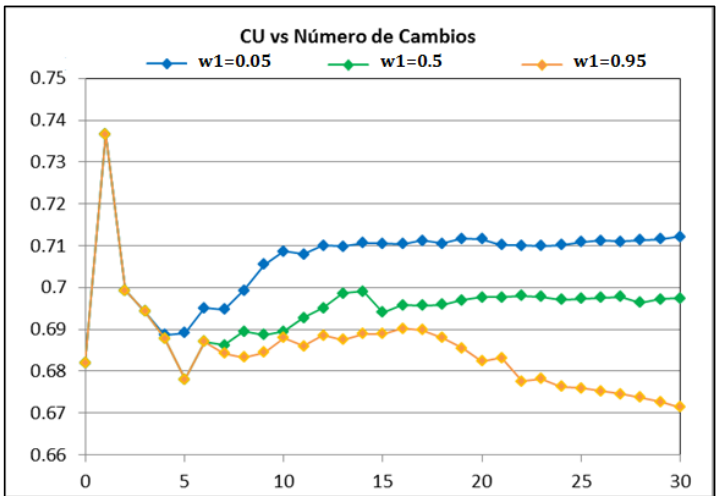


Figura 20. CU en instante de mínima presión vs Número de cambios. Red Ejemplo 2

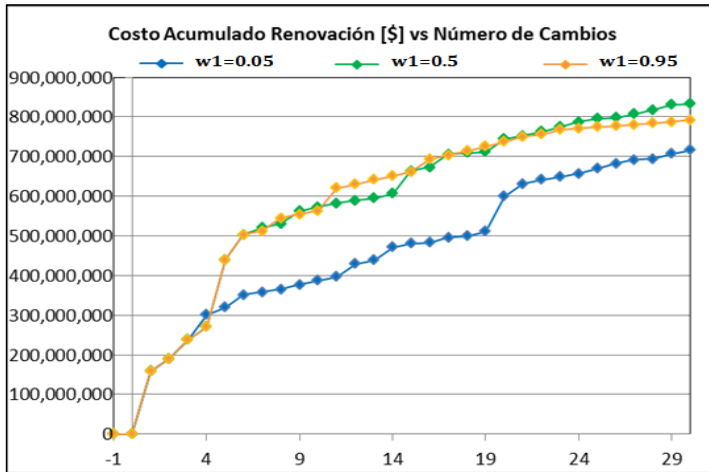


Figura 21. Costo de renovación [\$] vs Número de cambios. Red Ejemplo 2

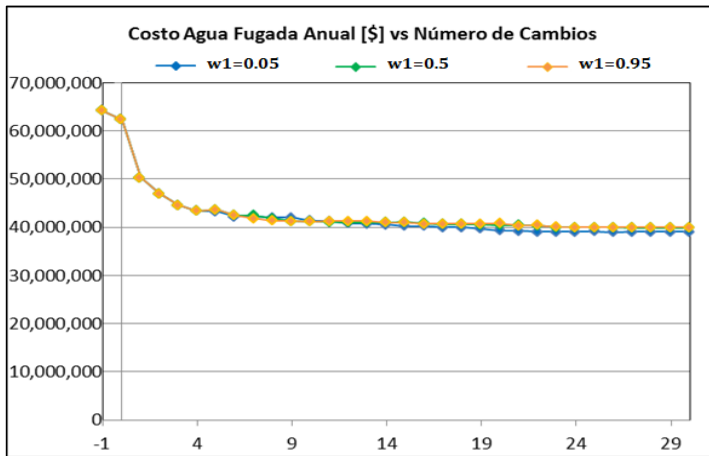


Figura 22. Costo del agua fugada anual [\$] vs Número de cambios. Red Ejemplo 2

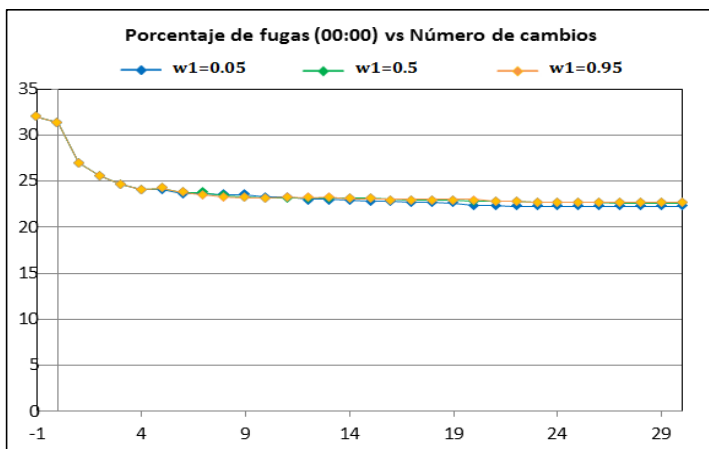


Figura 23. Porcentaje de fugas vs Número de cambios. Red Ejemplo 2

Las curvas $w_1=0.5$ y $w_1=0.95$ coinciden en las figuras 22 y 23. El cambio -1 es la situación inicial sin ningún tipo de cambios. El cambio 0 es el punto de partida del método de optimización después del ajuste inicial de las presiones (véase sección 5.5)

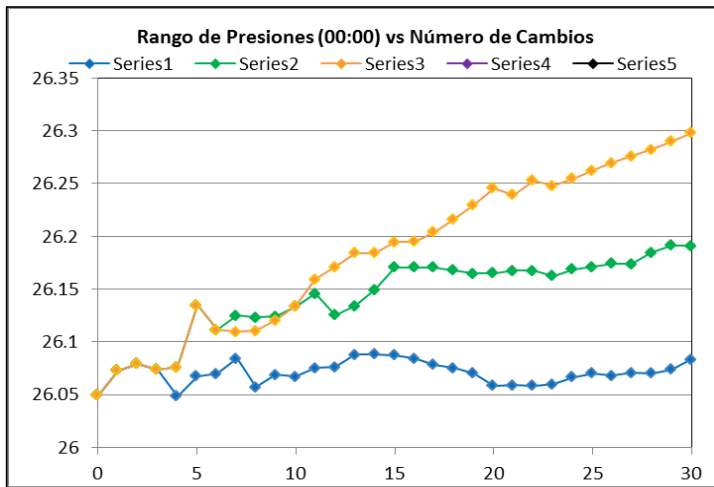


Figura 24. Rango de presiones [mca] vs Número de cambios. Red Ejemplo 2

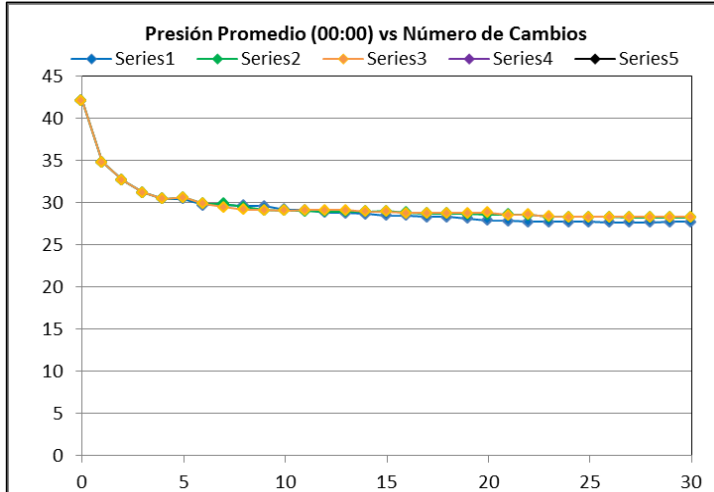


Figura 25. Presión promedio [mca] vs Número de cambios. Red Ejemplo 2

6.3 RED EJEMPLO 3

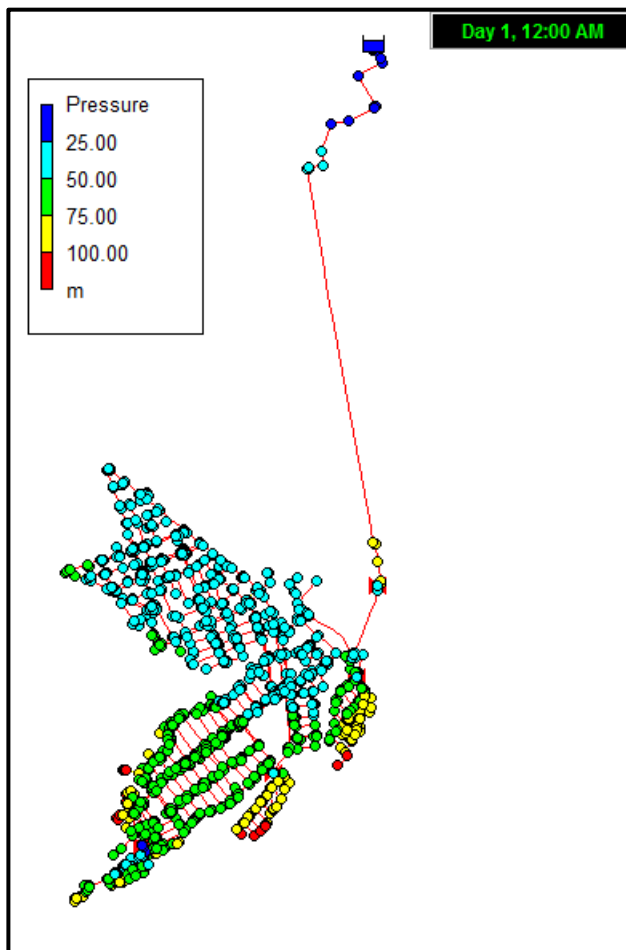


Figura 26. Red Ejemplo 3

Esta red corresponde al modelo del sector Morro Bajo del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A E.S.P. Es una red con 44 [km] de tubería correspondientes a 1988 tubos de diámetros entre 25 y 600 [mm], con coeficientes de Darcy-Weisbach entre 0.0015 y 0.26. Un caudal demandado promedio de 0.05134 [m^3/s]. En cuanto a la topografía de los nodos: Cubren 617 hectáreas en un rango de elevaciones de 213 [m], definitivamente muchísimo menos plana que las anteriores. La red no tiene asignados coeficientes de emisor en sus nodos. Los datos de entrada para la aplicación del algoritmo son:

Diámetro máximo del nuevo tubo= 500 [mm]

ε de Darcy-Weisbach para el nuevo tubo= 0.0015

Presión mínima = 15 mca

Kcosto = 1052.811 (el que se comenta en la sección 5.3.2)

Kcosto = 1.0138 (el que se comenta en la sección 5.3.2)

Parámetros de emisores = A manera de estimación en la reducción de fugas se asignan los parámetros por defecto ($C = 0.0001$ LPS/m.c. $a^{1.15}$; $a = 1.15$)

Costo del agua = $K_{agua} = 360$ \$/m³.

w1 = Se asignan 3 diferentes valores (0.05, 0.5, 0.95), que reflejan importancias baja, media y alta para cada una de las funciones objetivo: Índice de Resiliencia y Coeficiente de Uniformidad

Parámetro p del método = 350 (el máximo posible)

Número de cambios = 50

Existe una función del toolkit de Epanet que ejecuta una simulación hidráulica en un instante (ENrunH). Sin embargo, para ejecutar una simulación en un instante particular t_p , la función ejecuta todas las simulaciones en los instantes previos a t_p , es decir desde las 00:00 hasta t_p . Por lo tanto para esta red se opta por hacer la optimización del índice de resiliencia y el coeficiente de uniformidad en la hora cero, debido al tamaño de la red que se traduce en mayor tiempo de cómputo.

6.3.1 Resultados

$w_1 = 0.05$			$w_1 = 0.5$			$w_1 = 0.95$		
Cambio	ID Tubo	Nuevo Diámetro	Cambio	ID Tubo	Nuevo Diámetro	Cambio	ID Tubo	Nuevo Diámetro
1	44698	150	1	44698	150	1	44698	150
2	17001	100	2	17001	100	2	17001	100
3	44698	200	3	44698	200	3	44698	200
4	56233	200	4	17001	150	4	17001	150
5	56116	100	5	17002	100	5	17002	100
6	17001	150	6	56233	200	6	56233	200
7	17002	100	7	56116	100	7	31930	75
8	57739	75	8	31930	75	8	31314	75
9	56116	150	9	31359	75	9	30825	100
10	56233	250	10	31357	100	10	56108	100
11	17002	150	11	56116	150	11	31930	100
12	31359	75	12	31314	75	12	31314	100
13	31357	100	13	30825	100	13	31357	100
14	56108	100	14	56108	100	14	17002	150
15	30825	100	15	17002	150	15	31514	150
16	51645	100	16	31930	100	16	30825	150
17	56347	50	17	31314	100	17	30710	100
18	31362	100	18	31514	150	18	44573	150
19	56238	200	19	44573	150	19	30829	150
20	31546	100	20	30829	150	20	44698	250
21	31357	150	21	56233	250	21	44691	150
22	56107	100	22	44644	75	22	56107	100
23	56108	150	23	44698	250	23	56116	100
24	5123	100	24	57082	250	24	51645	100
25	31149	50	25	56107	100	25	57082	250
26	51650	100	26	30825	150	26	31359	75
27	51645	150	27	30710	100	27	5123	100
28	31176	100	28	56108	150	28	44644	75
29	56241	150	29	57739	75	29	56233	250
30	56241	200	30	5123	100	30	56108	150
31	44587	100	31	44691	150	31	31930	150
32	51659	100	32	30709	100	32	44690	100
33	51650	150	33	31930	150	33	44690	150
34	4911	100	34	15667	100	34	44690	200
35	56233	300	35	5114	75	35	31314	150
36	39266	100	36	44690	100	36	16801	250
37	31188	100	37	44690	150	37	44576	150
38	31156	75	38	44690	200	38	55965	150
39	44601	100	39	31314	150	39	57082	300
40	51659	150	40	16801	250	40	55964	150
41	4911	150	41	57082	300	41	V_16201	150
42	57739	100	42	55965	150	42	56010	150
43	39266	150	43	44576	150	43	31514	200
44	56239	150	44	56010	150	44	56238	200
45	56239	200	45	30846	100	45	30803	100
46	31414	100	46	30803	100	46	30846	100
47	31176	150	47	V_16201	150	47	30709	100
48	31188	150	48	56238	200	48	57739	75
49	31826	150	49	55964	150	49	44577	150
50	5049	100	50	31514	200	50	5114	75

Figura 27. Lista de cambios prioritarios para cada valor de w_1 . Red Ejemplo 3

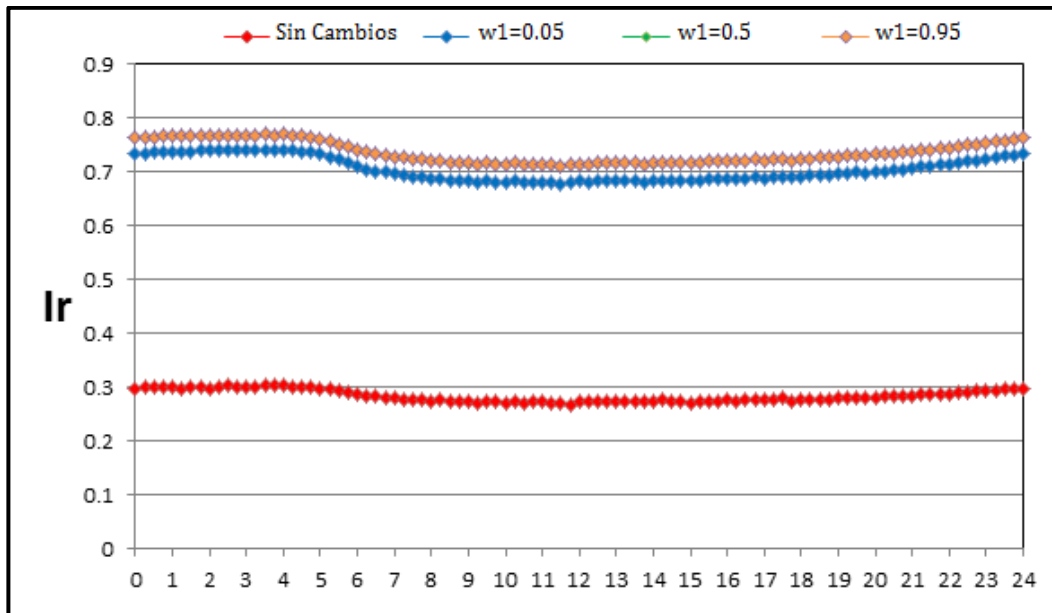


Figura 28. Evolución del Ir a lo largo del día luego de 50 cambios. Red Ejemplo 3

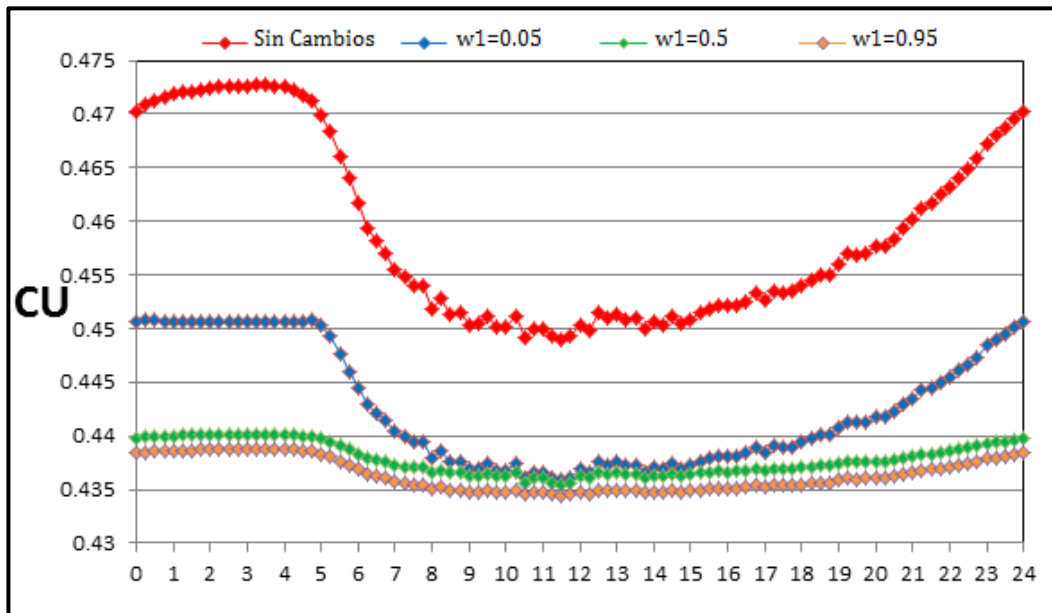


Figura 29. Evolución del CU a lo largo del día luego de 50 cambios. Red Ejemplo 3

En la figura 28 las curvas $w1=0.5$ y $w1=0.95$ coinciden. El rango de valores en que se encuentra el CU vuelve a ser mucho menor que el rango en el que se mueve Ir, y con esto la necesidad e importancia de normalizar las funciones objetivo para

que la priorización de tubos a renovar dado cualquier w_1 , no se vea sesgada a los tubos que mejoren el índice de resiliencia. El hecho que no se aumente el coeficiente de uniformidad (CU) no es un resultado raro, ya que el método de selección de tubos no está obligado a mejorar siempre la función objetivo y acepta peores movimientos en las mismas, eso sí, los movimientos menos peores (véase sección 5.5). Se observa que con un máximo de 50 cambios, el factor de importancia w_1 no hace que difieran notablemente los resultados finales, (objetivos no conflictivos), además se observa que sólo con los primeros 12 cambios es posible lograr grandes beneficios.

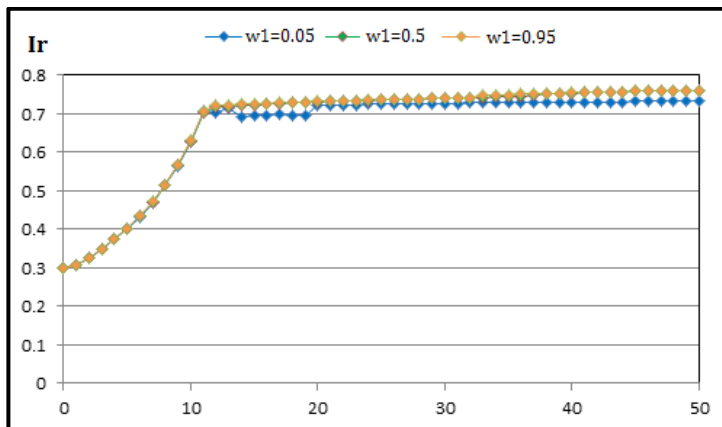


Figura 30. Ir en la hora cero vs Número de cambios. Red Ejemplo 3

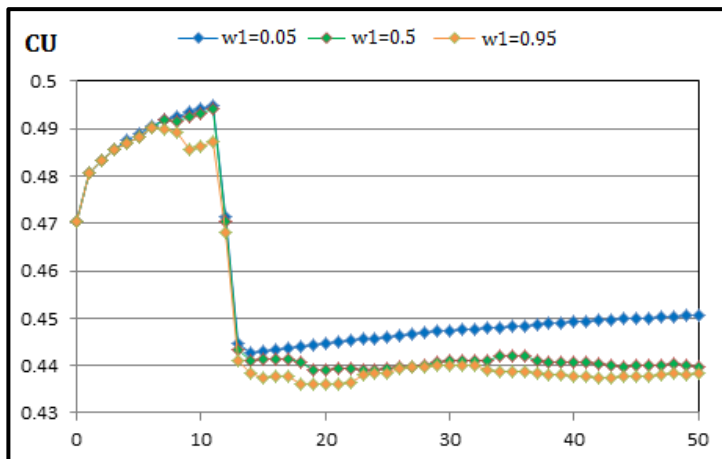


Figura 31. CU en la hora cero vs Número de cambios. Red Ejemplo 3

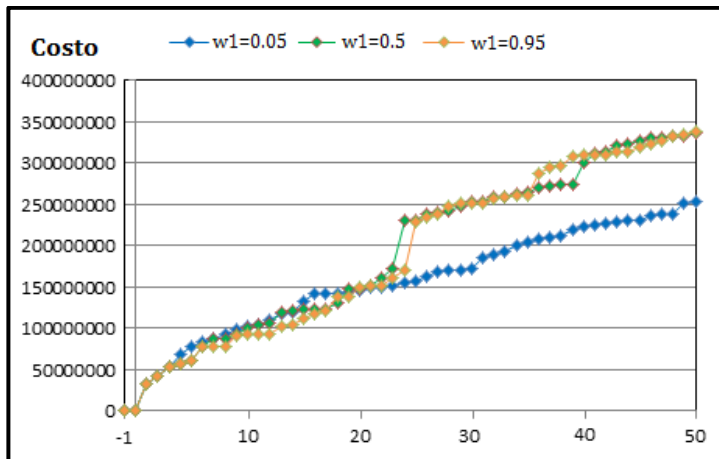


Figura 32. Costo de renovación vs Número de cambios. Red Ejemplo 3

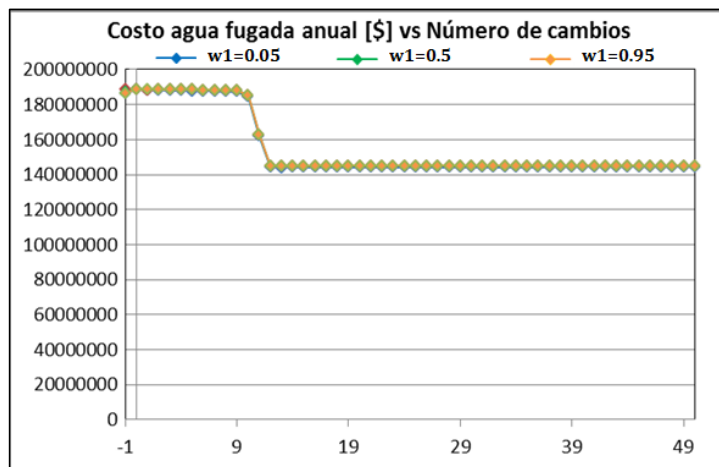


Figura 33. Costo del agua fugada anual vs Número de cambios. Red Ejemplo 3

El cambio -1 es la situación inicial sin ningún tipo de cambios. El cambio 0 es el punto de partida del método de optimización después del ajuste inicial de las presiones. Sin olvidar que la magnitud del volumen de agua fugado y en consecuencia el costo, está atado a los valores por defecto asignados a los parámetros de emisor; se observa un ahorro aproximado de 45 millones de pesos al año, en contraste con los aproximados 100 millones que constarían esos 12 cambios.

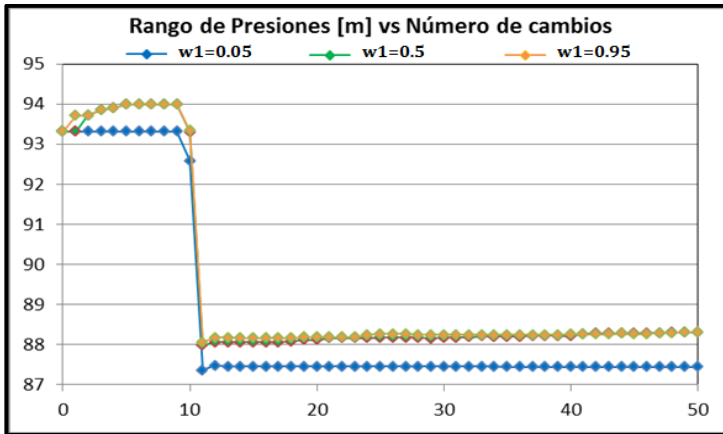


Figura 34. Rango de presiones en la hora cero vs número de cambios. Red ejemplo 3

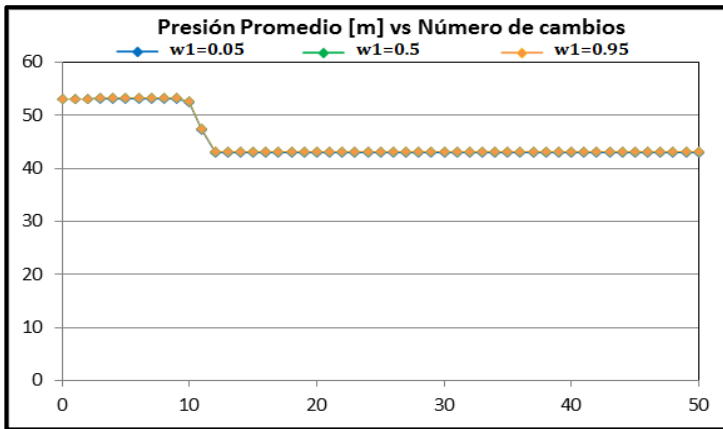


Figura 35. Presión promedio en la hora cero vs número de cambios. Red Ejemplo 3

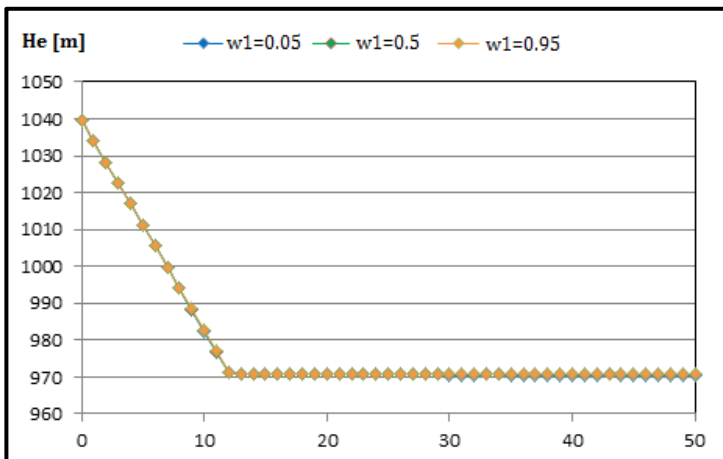


Figura 36. Altura piezométrica a la entrada de la red en la hora cero vs Número de cambios. Red Ejemplo 3

7 CONCLUSIONES

Se aplicó una metodología que eventualmente pueda contribuir a establecer las prioridades de reposición de tramos de tuberías. La misma está basada en el trabajo de Araque, D. 2006 [2] utilizando otro tipo de función objetivo y otras herramientas de cómputo.

La metodología aplica idealmente a redes que tengan definidos y calibrados sus parámetros de emisor ya que la estimación de costos del agua fugada está atada a los valores que tomen dichos parámetros. En ausencia de dichos parámetros, cualquier estimación de los mismos debe resultar acompañada de una verificación de que la magnitud de las fugas obtenidas sea racional.

Además de buscar menos dispersión en el estado de presiones, la metodología busca disminuir el nivel de presiones, por lo que las redes que presenten excesos de presión, son en principio apropiadas para la aplicación de la metodología.

Se debe continuar con la aplicación de la metodología a más distritos del AMB S.A ESP buscando clarificar y delimitar los casos donde la metodología resulta efectiva y buscando también posibles errores y mejoras en el algoritmo.

La estructura del algoritmo fue escrita en VBA (Visual Basic para Aplicaciones) de Microsoft Excel. Para la obtención de datos, simulaciones hidráulicas y modificaciones a la red se invocan varias funciones contenidas en la biblioteca Epanet2.dll "Toolkit".

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] ALONSO GUZMÁN, Carlos D. *Modelo híbrido para la toma de decisiones en programas de rehabilitación de tuberías para sistemas de abastecimiento de agua: Aplicación a la ciudad de Celaya, Gto (México)*. (Tesis Doctoral). Valencia, 2010. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Disponible en el Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica de Valencia:< <http://riunet.upv.es/>>
- [2] ARAQUE FUENTES, Diego A. *Optimización de redes con el fin de uniformizar el estado de presiones*. Bogotá, 2006. Trabajo de grado (Magíster en Ingeniería Civil). Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Disponible en el catálogo público en línea de la Biblioteca de la Universidad de los Andes: <<http://biblioteca.uniandes.edu.co/>>
- [3] ATHAN, T. & PAPALAMBROS, P. *A note on weighted criteria methods for compromise solutions in multi-objective optimization*. En: Engineering Optimization. Vol.27, Issue 2 (1996); p 155-176.
- [4] CHEUNG, Peter B. *Análise de reabilitação de redes de distribuição de água para abastecimento via algoritmos genéticos multiobjetivo*. Trabajo de grado (Doctor en Hidráulica y Saneamiento). São Paulo, 2004. Universidad de São Paulo. Escuela de ingeniería de São Carlos. Disponible en la Biblioteca Digital de Tesis y Disertaciones de la Universidad de São Paulo: < <http://www.teses.usp.br/>>
- [5] GUTIÉRREZ, Gabriel. *Diseño óptimo de redes bajo ambiente de fugas*. Bogotá. 2002. Trabajo de grado (ingeniero Civil). Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Disponible en el catálogo público en línea de la Biblioteca de la Universidad de los Andes: <<http://biblioteca.uniandes.edu.co/>>
- [6] MARLER, R.T. & ARORA, J.S. *Survey of multi-objective optimization methods for engineering*. En: Structural and Multidisciplinary Optimization. Vol.26, (6), (2004); p 369-395.
- [7] MARTÍNEZ RODRÍGUEZ, José B. *El concepto de garantía en las redes de suministro de agua potable*. En: Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Vol.24, (3), (2003); p 49-54.

- [8] MENDOZA F.L & SALDARRIAGA J.G. *Diseño optimizado de redes de distribución de agua incluyendo análisis de costo mínimo versus resiliencia de la red*. En: XIX SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA. (2010). Bogotá.
- [9] PRASAD, T.D & PARK N-S, *Multiobjective genetic algorithms for design of water distribution networks*. En: Journal of Water Resources Planning and Management. Vol.130, Issue 1 (2004); p 73-82.
- [10] RAAD, Darian N. *Multi-objective optimization of water distribution systems design using metaheuristics*. Tesis Doctoral. (Investigación de Operaciones). Stellenbosch (Sudáfrica), 2011. Universidad de Stellenbosh. Facultad de Economía y ciencias de la administración. Departamento de Logística. Disponible en el Repositorio de Investigaciones de la Universidad de Stellenbosh: < <http://scholar.sun.ac.za/>>
- [11] SALDARRIAGA, Juan G. CONTRERAS, Felipe S. *Metodología para la determinación del plano óptimo de presiones en una red de distribución de agua potable*. En: XX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA. (2002), La Habana.
- [12] SALDARRIAGA J.G, OCHOA S, MORENO M, ROMERO N & CORTÉS O. *Renovación priorizada de redes de distribución utilizando el concepto de potencia unitaria*. En: Revista de Ingeniería, Universidad de los Andes. #31, (2010); p 7-15.
- [13] SALDARRIAGA Juan G, ROMERO N. & OCHOA S. *Rehabilitación priorizada de redes de distribución utilizando potencia disipada*. En: XVIII SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA. (2008). Bogotá.
- [14] SALDARRIAGA Juan G, SERNA Manuel & ARBELÁEZ Juliana. *Diseño de redes de distribución incluyendo el concepto de resiliencia*. En: XVIII SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA. (2008). Bogotá.
- [15] TODINI, Ezio. *Looped water distribution networks design usign a resilience index based heuristic approach*. En: Urban Water. Vol.2, Issue 2 (Junio, 2000); p 115-122.
- [16] VILLALBA FERNÁNDEZ DE CASTRO, Germán A. *Efecto de la redundancia en redes de distribución de agua potable en la confiabilidad y en costos*. En: XX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA. (2002), La Habana.