

CREACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE REHABILITACIÓN DE REDES DE
ACUEDUCTO CON BASE EN MEDIDAS SUSTITUTIVAS DE CONFIABILIDAD.
APLICADA EN DOS SECTORES HIDRÁULICOS DEL amb S.A. E.S.P

JORGE ALFREDO MUEGUES FARFÁN

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2015

CREACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE REHABILITACIÓN DE REDES DE
ACUEDUCTO CON BASE EN MEDIDAS SUSTITUTIVAS DE CONFIABILIDAD.
APLICADA EN DOS SECTORES HIDRÁULICOS DEL amb S.A. E.S.P

JORGE ALFREDO MUEGUES FARFÁN

Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero civil

Director

LUIS FERNANDO CASTAÑEDA GALVIS

Ingeniero Civil. M.sc.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2015

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar le doy gracias a Dios por permitirme alcanzar este logro, A mi esposa que siempre me apoyo en todo momento, a mis padres Luis Alfredo Muegues y Carmen Beatriz Farfan por su constante apoyo y por creer en mí, al Ingeniero Civil y Director de proyecto Luis Fernando Castañeda por su aporte, colaboración y disponibilidad durante el desarrollo de este proyecto de grado.

JORGE ALFREDO MUEGUES FARFÁN

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	13
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	15
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	16
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	16
3. MARCO REFERENCIAL.....	17
3.1. UNIFORMIZAR EL ESTADO DE PRESIONES.....	18
3.2. INDICADORES DE COMPORTAMIENTO HIDRAULICO EN REDES DE ACUEDUCTO.....	18
3.2.1. Índice de resiliencia.....	18
3.2.2. Coeficiente de uniformidad de presiones.....	20
3.3. METODOLOGIAS PREDECESORAS.....	20
4. METODOLOGIA.....	22
4.1. SELECCIÓN DE LOS DISTRITOS HIDRAULICOS.....	22
4.1.1. Distrito Centro.....	22
4.1.1.1. Patrón de consumo centro.....	24
4.1.2. Distrito morro alto.....	25
4.1.2.1. Patrón de consumo Morro alto.....	25
4.2. METODOLOGIA PARA LA CALIBRACIÓN DEL SISTEMA.....	25
4.2.1. MODELO INICIAL.....	27
4.2.2. LINEA DE BASE 1.....	27
4.2.2.1. Análisis por demandas desconocidas.....	27
4.2.2.2. Análisis por emisores.....	28
4.2.3. LINEA DE BASE 2.....	28
4.2.3.1. Análisis por perdidas menores.....	29
4.2.3.2. Análisis por rugosidades.....	29

4.2.3.3. Análisis por diámetros.....	29
4.2.4. MODELO UNIFICADO.....	29
4.3. MAXIMIZACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO.....	30
4.3.1. Maximizar el índice de resiliencia.....	30
4.3.2. Maximizar el coeficiente de uniformidad de presiones.....	30
4.3.3. Definición de la función objetivo.....	31
4.3.4. Función de costos.....	32
4.4. DATOS DE ENTRADA DE LA FUNCIÓN OBJETIVO Y FUNCIÓN DE COSTOS.....	35
4.5. EJECUCIÓN DEL ALGORITMO.....	36
5. RESULTADOS.....	39
5.1. ANALISIS DEL PRIMER ESCENARIO.....	39
5.1.1. Comportamiento red de distribución Centro.....	39
5.1.2. Comportamiento red de distribución Morro alto.....	43
5.2. ANALISIS DEL SEGUNDO ESCENARIO.....	47
5.2.1. Comportamiento de la red de distribución Centro.....	47
5.2.2. Comportamiento red de distribución Morro alto.....	51
5.3. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGIA.....	56
6. CONCLUSIONES.....	57
BIBLIOGRAFIA.....	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Materiales presentes en la red Centro.....	22
Figura 2. Distribución porcentual por unidad de los materiales de la red Centro...23	23
Figura 3. Distribución porcentual de los diámetros en la red por unidad Centro...24	24
Figura 4. Patrón de consumo centro.....	24
Figura 5. Modelo hidráulico sector Morro alto.....	25
Figura 6. Patrón de consumo Morro alto.....	25
Figura 7. Metodología para realizar la calibración.....	26
Figura 8. Costo de construcción 2002 vs diámetro.....	33
Figura 9. Costo de construcción 2015 vs diámetro.....	35
Figura 10. Interfaz inicial del algoritmo.....	36
Figura 11. Índice de resiliencia (50 cambios) T=24h centro.....	39
Figura 12. Coeficiente de uniformidad. (50 cambios) T=24h centro.....	40
Figura 13. Ir vs número de cambios. Centro.....	40
Figura 14. Cu vs número de cambios. Centro.....	41
Figura 15. Costo de renovación Vs número de cambios. Centro.....	41
Figura 16. Índice de resiliencia (50 cambios) T=24. Morro alto.....	43
Figura 17. Coeficiente de uniformidad. (50 cambios) T=24h. Morro alto.....	44
Figura 18. Ir vs número de cambios. Morro alto.....	44
Figura 19. Cu vs número de cambios. Morro alto.....	45
Figura 20. Costo de renovación Vs número de cambios. Morro alto.....	45
Figura 21. Índice de resiliencia (50 cambios) T=24h centro.....	47
Figura 22. Coeficiente de uniformidad. (50 cambios) T=24h centro.....	48
Figura 23. Ir vs número de cambios. Centro.....	48
Figura 24. Cu vs número de cambios. Centro.....	49
Figura 25. Costo de renovación Vs número de cambios. Centro.....	49
Figura 26. Índice de resiliencia (50 cambios) T=24. Morro alto.....	51
Figura 27. Coeficiente de uniformidad. (50 cambios) T=24h. Morro alto.....	52
Figura 28. Ir vs número de cambios. Morro alto.....	53

Figura 29. Cu vs número de cambios. Morro alto.....53
Figura 30. Costo de renovación Vs número de cambios. Morro alto.....54
Figura 31. Diagrama de flujo metodología.....56

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Materiales presentes en la red Centro.....	23
Tabla 2. Diámetros presentes en la red Centro.....	24
Tabla 3. Clasificaciones típicas de los nodos en el análisis por demandas desconocidas.....	28
Tabla 4. Clasificaciones típicas de los nodos en el análisis por emisores.....	28
Tabla 5. Cantidades de materiales en m ³	32
Tabla 6. Análisis de precios unitarios. Año 2002.....	32
Tabla 7. Análisis de precios unitarios año 2015.....	34
Tabla 8. Importancias dadas para el Ir y Cu.....	36
Tabla 9. Distribución de importancia de las medidas de confiabilidad.....	37
Tabla 10. Listado de tuberías a rehabilitar, aumentando el diámetro. W1=50% Centro.....	42
Tabla 11. Listado de tuberías a rehabilitar, aumentando el diámetro. W1=50%. Morro alto.....	46
Tabla 12. Listado de tuberías a rehabilitar, aumentando el diámetro. W1=5% Cetro calibrado.....	50
Tabla 13. Listado de tuberías a rehabilitar, aumentando el diámetro. W1=5%.Morro alto calibrado.....	55

RESUMEN

TITULO: CREACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE REHABILITACIÓN DE REDES DE ACUEDUCTO CON BASE EN MEDIDAS SUSTITUTIVAS DE CONFIABILIDAD. APLICADA EN DOS SECTORES HIDRÁULICOS DEL amb S.A. E.S.P.*

AUTOR: JORGE ALFREDO MUEGUES FARFÁN**

PALABRAS CLAVES: CONFIABILIDAD HIDRÁULICA, ÍNDICE DE RESILIENCIA, COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD, RENOVACIÓN DE TUBERÍAS, METODOLOGÍA.

Actualmente la metodología utilizada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga para la renovación de tuberías se basa en métodos estadísticos dependiendo donde se presenten fallas o daños, escogiendo los lugares donde ocurran el mayor número de daños para realizar las reposiciones, pero estos cambios no garantizan que se mejore la confiabilidad hidráulica de la red. El presente trabajo consiste en desarrollar una metodología de renovación de tuberías para el acueducto metropolitano de Bucaramanga que incremente la confiabilidad hidráulica de un sistema de distribución de agua potable basado en medidas sustitutivas de confiabilidad optimizando dos indicadores de desempeño hidráulico como lo son el índice de resiliencia (I_r) y el coeficiente de uniformidad de presiones (C_u). El coeficiente de uniformidad es una medida por la cual se puede cuantificar la uniformidad de las presiones en los nodos de la red, mientras que el índice de resiliencia es un indicador con el cual se puede relacionar la potencia unitaria de entrada en la red, con la potencia unitaria perdida internamente y la potencia entregada en los nodos de demanda. De esta forma se busca realizar las tareas de reparación y reposición de tuberías de una manera organizada, asignando prioridades de renovación a los tubos de la red que permita minimizar los recursos y mejorar la confiabilidad del sistema.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenieras Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Fernando Castañeda Galvis, Ingeniero Civil

ABSTRACT

TITLE: CREATING A REHABILITATION METHODOLOGY AQUEDUCT NETWORKS BASED ON RELIABILITY ALTERNATIVES. APPLIED IN TWO HYDRAULICS SECTORS amb SA E.S.P. *

AUTHOR: JORGE ALFREDO MUEGUES FARFÁN**

KEYWORDS: hydraulic reliability, Resilience index, coefficient of the pressures, Pipe renovation, Methodology.

Currently the methodology used by the Metropolitan Aqueduct of Bucaramanga for the renovation of pipes is based on statistical methods depending where failure or damage occur, choosing the places where they occur the more injury for replenishments.

The aim of writing this project consists in developing a methodology that increases the hydraulic reliability of a system of distribution of potable water based in substitute measures of reliability optimizing two indicators of hydraulic performance such as resilience index (Ir) and the coefficient of uniformity of pressures (Cu). The coefficient of uniformity is a module which is able to quantify the uniformity of the pressures at the nodes of the network, while the resilience index is a measure of hydraulic reliability that relates network's input power with internal unitary power loss and power delivered on demand nodes. In this way it seeks to perform the tasks of repairing and replacement of pipes in an organized way by assigning priorities for renewal to the network's tubes, allowing to minimize resources and improve the reliability of the system.

*Work Degree

* Faculty of Engineering Physics and Mechanics. School of Civil Engineering. Director Luis Fernando Castañeda Galvis

INTRODUCCIÓN

El constante crecimiento poblacional urbano trae consigo la necesidad de mejorar las redes de distribución de agua existentes; estas redes están compuestas por tuberías, accesorios, bombas y válvulas, las cuales funcionan en conjunto y tienen como propósito abastecer o distribuir el agua a los consumidores bajo unas condiciones y requerimientos mínimos (Presiones, caudales, Horarios, etc.).

Dado a que el agua es hoy en día un recurso natural limitado, es necesario la creación de nuevos embalses y reservorios, esto conlleva al aprovechamiento de los sistemas de distribución de agua al 100%. Por esto, los sistemas de distribución y sus componentes de infraestructura requieren ser estudiados y analizados para optimizar su desempeño.

Además el continuo cambio al cual se encuentra las redes de agua potable altera el comportamiento hidráulico de la misma, trayendo consigo el deterioro de la red, estos daños pueden producir menor capacidad de transporte del recurso hídrico, aumento en las presiones de bombeo y aumento en los costos de operación y mantenimiento.

En consecuencia, es vital elaborar planes de mantenimiento, actualmente existen diferentes tipos de mantenimiento que son el mantenimiento predictivo, mantenimiento preventivo y mantenimiento correctivo. Los mantenimientos predictivos proporcionan información de las condiciones físicas de las tuberías por medio de ensayos o métodos no destructivos, los mantenimientos preventivos se refieren a la inspección de un elemento para tratar de evitar que se produzca su fallo, mientras que el mantenimiento correctivo es un mantenimiento de reparación que sigue después de un fallo o rotura en el sistema, no es programado previamente y es requerido por una determinada avería. Estas reparaciones se

hacen necesarias para mantener los niveles de servicios mínimos requeridos para el sistema, estos requisitos en el caso de Colombia están basados en el Reglamento Técnico del sector de Agua potable y Saneamiento Básico (RAS).

Por medio de los mantenimientos se podría obtener una mejor confiabilidad y eficiencia de la red. Sin embargo, no es conveniente debido a la obligación de tomar soluciones efectivas a la hora de rehabilitar tuberías, sería ideal incluir en los planes de mantenimiento el comportamiento dinámico y desempeño hidráulico del sistema además de la satisfacción del consumidor, en sustitución del análisis de probabilidad de falla por sectores que se utiliza habitualmente.

A raíz de todo esto se han planteados metodologías para lograr tener planes de mantenimiento más organizados, económicos y que además puedan mejorar la confiabilidad hidráulica del sistema, pero no han tenido en cuenta la calibración de la red, con lo cual los modelos utilizados no están acordes con la realidad.

Este trabajo busca crear una metodología para desarrollar un mantenimiento predictivo de las tuberías a renovar, basándose en el grado de confiabilidad hidráulica de la red, consiguiendo así maximizar la conservación de la energía disipada por el sistema, y uniformizar el estado de presiones de la red. Todo esto a partir de modelos calibrados y realizar una comparación de los resultados entre un modelo calibrado y uno sin calibrar para analizar la diferencia que existe entre los métodos. [1][5][8]

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad la reposición de redes se realiza con base en modelos estadísticos, que analizan la probabilidad de un elemento a fallar. Es decir, se necesita información asociada a los daños ocurridos en intervalos de tiempo sobre la red de distribución, sin embargo, estas metodologías no garantizan que las redes sean más confiables desde el punto de vista hidráulico.

En el año 2006 D. Araque y J.G Saldarriaga presentaron un estudio sobre la optimización de redes de acueductos con el fin de maximizar la uniformidad del estado de presiones en una red de distribución de agua potable[2], basándose en el grado de confiabilidad hidráulica, teniendo como fin maximizar la conservación de energía y disipada por el sistema.

El presente proyecto busca crear una metodología aplicada a dos sectores hidráulicos del amb S.A. E.S.P, que mejore la confiabilidad del sistema con base en medidas sustitutivas de confiabilidad, como lo son el índice de resiliencia y el coeficiente de uniformidad.

Esta metodología le servirá a las empresas de servicios públicos para realizar la renovación de las tuberías de una manera organizada, que minimicen los recursos y mejoren la confiabilidad del sistema.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una metodología de renovación de tuberías donde se determinen los cambios que maximicen medidas sustitutivas de confiabilidad de manera que se pueda direccionar mejor el trabajo. Utilizando planos de presiones reales provenientes de redes calibradas.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Crear y analizar en Epanet 2.0, dos redes pilotos en las cuales se analizará la metodología.
- Definir la prioridad de renovación de tuberías con base en la maximización de una función objetivo basada en medias sustitutivas de confiabilidad.
- Generar una metodología para la renovación tuberías mejorando la uniformización de presiones de la red, y con base en modelos hidráulicos calibrados.
- Realizar la calibración e implementar la metodología en dos sectores pilotos del amb S.A. ESP.

3. MARCO REFERENCIAL

Para iniciar los modelos de rehabilitación se pueden clasificar o agrupar en 2 grupos diferentes [5].

- Modelos estadísticos
- Modelos de análisis de sistemas

Los modelos estadísticos son los utilizados comúnmente al momento de realizar la rehabilitación de una red de distribución, debido a que el objetivo prioritario es reponer los elementos que presenten daños o fallas sin tener en cuenta el análisis hidráulico del sistema, estas rehabilitaciones se realizan por medio de modelos estadísticos.

Por otro lado, los modelos de análisis de sistemas se caracterizan por identificar los elementos a rehabilitar dentro del sistema, pero teniendo en cuenta el análisis hidráulico de la red. Para esto es necesario la utilización de herramientas de simulación hidráulica.

Una alternativa ideal sería la rehabilitación de todos los componentes hidráulicos deteriorados en un sistema, sin embargo, no es factible desde el punto de vista económico, pues los recursos financieros disponibles son limitados e insuficientes para contemplar todo el sistema, por consiguiente la elección de la mejor alternativa para la rehabilitación de un sistema de distribución no es tarea fácil, pues los objetivos son múltiples además estas decisiones no solo considera aspectos económicos y físicos, sino también su efecto en la confiabilidad del sistema.

3.1 UNIFORMIZAR EL ESTADO DE PRESIONES

Para obtener un funcionamiento óptimo de una red de distribución es necesario tener unos niveles de caudales y presiones que puedan garantizar el consumo de la comunidad, pero debido a que el caudal demandado es una constante, la presión será el criterio a controlar para la correcta operación del sistema.

Dentro de una red se presentan 2 niveles de presiones, uno máximo y otro mínimo, el mínimo se da justo cuando se entrega el caudal de diseño requerido por los nodos de consumo dado que es el momento cuando se produce el nivel mínimo de energía, mientras que el máximo se presenta cuando el sistema no se encuentra en funcionamiento, dado que se estaría ejerciendo la máxima presión producida por la cabeza de entrada ya sea por los tanques de almacenamiento o válvulas reguladoras de presión. Estos niveles de presión máximos aumentan las fugas dentro de la red, además de disminuir la confiabilidad del sistema porque los elementos estarían sometidos a presiones que pueden sobrepasar las presiones de diseño para los cuales fueron fabricados, y los niveles mínimos por debajo de los mínimos permitidos afectan la llegada del flujo a los nodos de consumo. Para evitar estos problemas es necesario uniformizar el estado de presiones de toda la red.

3.2 INDICADORES DE COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO EN REDES DE ACUEDUCTO

3.2.1 Índice de resiliencia (Ir)

El índice de resiliencia definido por Todini(2000)[13] está basado en el concepto de que la potencia total de entrada en una red de distribución es igual a la potencia por unidad de peso disipada por el sistema, debido a la fricción, más la potencia por unidad de peso entregada por el sistema en los nodos de consumo.

$$P_{total} = P_{ent} + P_{sal}$$

La potencia total que entra al sistema incluye la potencia proporcionada por las bombas más la potencia entregada por las fuentes de energía correspondiente a embalses, depósitos o tanques de almacenamiento.

$$P_{ent} = \sum_{e=1}^{ne} Q_e H_e + \sum_{i=1}^{nbom} P_i$$

Donde Q_e y H_e son el caudal y la cabeza de entrada; ne es el número de embalses; P_i es la potencia por unidad de peso suministrada por la bomba i ; $nbom$ son el número de bombas en la red. Por otro lado, la potencia total de salida está dada por la siguiente ecuación.

$$P_{sal} = \sum_{j=1}^{nn} Q_j H_j$$

Donde Q_j es la demanda en el nodo correspondiente; H_j es la presión con la cual se supe la demanda Q_j ; y nn es el nuenmro de nodos que conforma el sistema.

Por lo tanto el Índice de resiliencia está definido como:

$$I_r = 1 - \frac{P_{max}}{P_{ent}^{max}}$$

Donde P_{ent} es la potencia disipada por el sistema y P_{ent}^{max} es la máxima potencia que puede ser disipada por la red para así asegurar la demanda Q y la presión mínima H^* necesaria en cada uno de los nodos de consumo.

Reemplazando los valores adecuados y simplificando la ecuación se puede obtener la expresión para el índice de resiliencia.

$$I_r = \frac{\sum_{j=1}^{nn} Q_j (H_j - H_j^*)}{\left[\sum_{e=1}^{nr} Q_e H_e + \sum_{i=1}^{npu} P_i \right] - \sum_{j=1}^{nn} Q_j H_j^*}$$

3.2.2 Coeficiente de uniformidad

SALDARRIAGA.J Y ARAQUE.D (2005)[4] definen al Coeficiente de uniformidad como el índice utilizado para detallar el grado de uniformidad del estado de presiones de la red, el cual relaciona la presión sobre todos los nodos con la máxima presión de entrega controlada.

$$CU = \frac{\sum_{j=1}^{nn} P_j}{nn * \max\{P_j\}}$$

Donde P_j es la presión de servicio en el nodo j y nn el número de nodos en la red.

3.3 METODOLOGÍAS PREDECESORAS

Saldarriaga.J Y Araque.D[3] utilizaron el índice de resiliencia para crea una metodología que permitiera elegir las tuberías en una red existente, que deben ser rehabilitadas, con el propósito de obtener el mayor incremento de la resiliencia de la red, y a su vez en su confiabilidad. Donde propone un marco de referencia en el cual por medio de modelaciones y algoritmos determinísticos (Algoritmos tipo Greedy) [5], se pueden localizar dentro de la red de distribución de agua potable el punto óptimo en el que se debe priorizar la rehabilitación con el objetivo de uniformizar el estado de presiones de servicio, incluyendo dos términos importantes como lo son el Índice de resiliencia [11] y el Coeficiente de uniformidad de las redes [4].

Martines,S (2011)[13] en su tesis de pregrado realizo un estudio con base en la investigación antes mencionada, aunque con algunas modificaciones en el algoritmo aplicado, desarrollando a su vez un programa ejecutable en Visual Basic para aplicaciones (VBA) de Microsoft Excel, utilizando el toolkit de Epanet como herramienta de edición y simulación; esta herramienta permite estimar el costo del agua no contabilizada anual, el rango de presiones a la cual se encuentra sometida

la red, el promedio de las presiones en los nodos de consumo, La cabeza inicial del primer embalse además del costo de renovación. Esta metodología fue aplicada en tres ejemplos, siendo uno de ellos el sector de Morro Bajo del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A E.S.P.

4. METODOLOGIA

4.1 SELECCIÓN DE LOS DISTRITOS HIDRAULICOS.

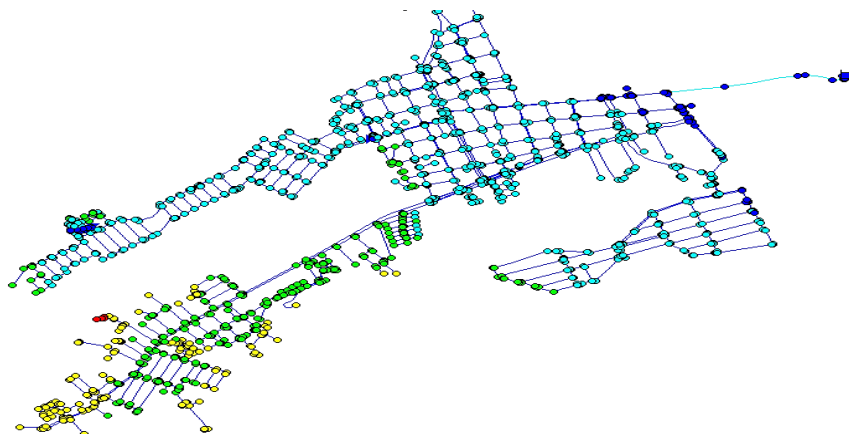
Para el desarrollo de este trabajo fueron escogidos dos sectores hidráulicos pertenecientes al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, Los distritos Centro y Morro Alto.

Los modelos hidráulicos así como los datos de la topología de la red utilizados en este proyecto fueron cedidos por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga amb.S.A. E.S.P.

4.1.1 Distrito Centro

La red distribución del distrito Centro está conformado por el sectores anteriormente descritos, el sector del centro contiene 50. 77[km] de tuberías de distintos materiales, rugosidades y diámetros, siendo los tubos en PVC y Hierro fundido los que conforman el mayor porcentaje en la red. Este sector cuenta con 1 tanques de almacenamiento ubicados en la intercepción de la avenida quebrada seca con la calle 45 y 2 válvulas reguladoras.

Figura 1. Modelo hidráulico sector centro

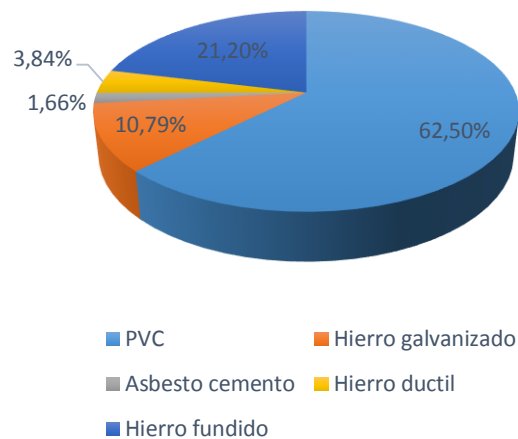


El sector del centro está conformada en su mayoría por tuberías de material PVC, a continuación una lista completa con todos los materiales que se encuentran en la red de distribución.

Tabla 1. Materiales presentes en la red Centro

MATERIALES	RUGOSIDAD	UNIDADES	PORCENTAJE	LONGITUD m	PORCENTAJE
PVC	0.0015	1465	62.50%	41810.71	75.36%
Hierro galvanizado	0.15	253	10.79%	7335.93	13.22%
Asbesto cemento	0.03	39	1.66%	1890.34	3.41%
Hierro ductil	0.25	90	3.84%	3943.13	7.11%
Hierro fundido	0.26	497	21.20%	498.1	0.90%
Total		2344	100%	55478.21	100%

Figura 2. Distribución porcentual por unidad de los materiales de la red Centro.



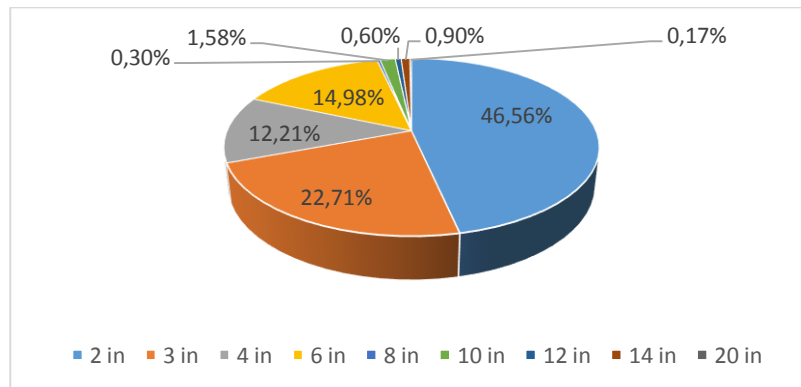
Al igual que la descripción basada en los materiales vista anteriormente, las redes de distribución de agua potable también se pueden detallarse a partir de los diámetros de las tuberías que componen la red, en el caso del sector Centro, se presentan diversos diámetros que varían desde tubos de 2 In (50.8 mm) hasta llegar a 20 In(500mm) de diámetro. La clasificación por diámetros se presenta en la tabla 2. (Ver anexo 1)

Tabla 2. Diámetros presentes en la red Centro

Diametros "	Unidades	Porcentajes	Longitud	Porcentaje %
2 in	1091	46.56%	27793.55	49.83%
3 in	532	22.71%	9085.88	16.29%
4 in	286	12.21%	5566.5	9.98%
6 in	351	14.98%	9802.8	17.58%
8 in	7	0.30%	7.0	0.01%
10 in	37	1.58%	1417.6	2.54%
12 in	14	0.60%	752.6	1.35%
14 in	21	0.90%	1341.6	2.41%
20 in	4	0.17%	4.0	0.01%
total	2343	100%	55771.4	100%

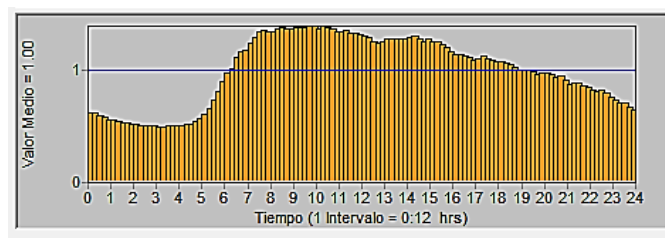
En la figura 3 se ilustra la distribución porcentual de los materiales presentes en la red.

Figura 3. Distribución porcentual de los diámetros en la red por unidad. Centro



4.1.1.2 Patrón de consumo: El patrón de consumo utilizado en el modelo hidráulico se puede observar en la siguiente figura.

Figura 4 Patrón de consumo centro.

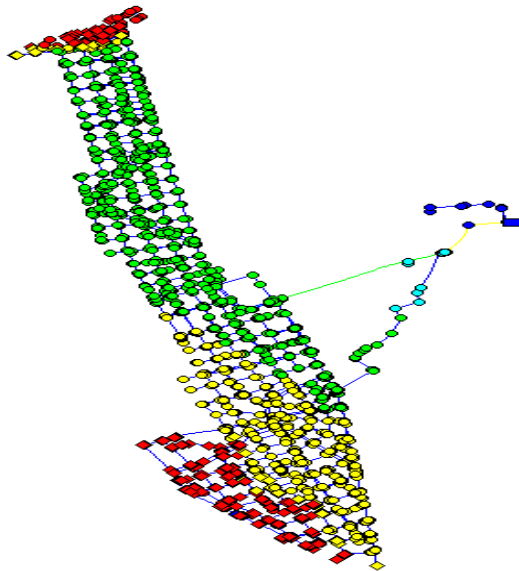


Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

4.1.2 Distrito Morro Alto

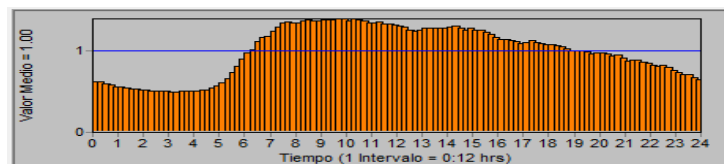
La red distribución del distrito Morro Alto contiene 62.28[km] de tuberías de distintos materiales, y diámetros, siendo los tubos de PVC los de mayor presencia en la red. Este sector cuenta con 1 tanques de almacenamiento y no tiene presencia de válvulas reguladoras.

Figura 5. Modelo hidráulico sector Centro



4.1.2.1 Patrón de consumo

Figura 6 Patrón de consumo centro.



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

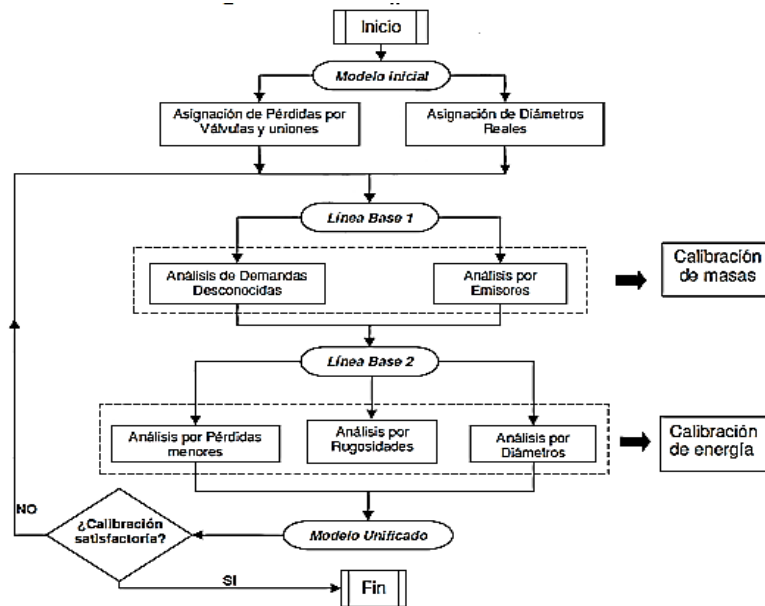
4.2 METODOLOGIA PARA LA CALIBRACIÓN DEL SISTEMA

Debido a que este proyecto se enfoca en la rehabilitación y no en el diseño de redes de distribución de agua potable, es muy difícil poder conocer el estado real de dichas variables, debido a esto, es indispensable realizar un ajuste a los modelos hidráulicos, todo está para que dichos sistemas posean la cualidad de reproducir el correcto funcionamiento del sistema ubicado en campo, todo este proceso es conocido como calibración y es esencial para que el modelo hidráulico del RADP sea eficiente al momento de tomar decisiones en trabajos de operación y mantenimiento.[10]

Para realizar este procedimiento se realizan mediciones de caudal y presión en distintos puntos de la red de distribución, los puntos de medición de caudal están ubicados en el punto de entrada de la red y representan toda la masa que ingresa al sistema mientras que los puntos de medición de presiones se localizan a lo largo de todo el sistema, estos puntos miden la energía consumida en el transporte y distribución del agua.

La Universidad de los Andes ha utilizado una metodología para la calibración de redes de distribución de agua potable, la cual brinda un enfoque sistemático al problema, ordenando las variables involucradas de acuerdo a sus principales características. A continuación se presenta esta metodología.[7].

Figura 7. Metodología para realizar la calibración



Fuente: Ciacua. Universidad de los Andes

4.2.1 MODELO INICIAL

El modelo inicial se crea a partir de analizar toda la información topológica y de consumo proporcionada por la empresa que brinda el servicio de agua potable, en este caso el Acueducto metropolitano de Bucaramanga amb E.S.P y plasmarlos en un modelo hidráulico, este modelo inicial no contiene perdidas menores en los nodos.

4.2.2. LINEA BASE 1

La línea de base 1 se trata básicamente de asignar los diámetros internos reales y cada tipo de material a todas las tuberías que conforman la red, adicional a esto se añade un coeficiente de perdidas menores por metro mediante un análisis de prueba y error, para simular el efecto de perdida en las uniones principalmente.

4.2.2.1 Análisis por demandas desconocidas

El análisis de demandas desconocidas se realiza con el fin de reconocer las zonas en las que probablemente puedan existir perdidas comerciales creando algunos escenarios hidráulicos realizados al modificar la demanda base de algunos nodos de la red.

Así mismo con estas modificaciones se busca ajustar la masa que entra y sale de la red de distribución, debido a que la demanda facturada a los usuarios, siempre está por debajo de la demanda real.

Estos escenarios se construyen teniendo en cuenta la información socioeconómica del distrito y de los nodos que lo conforman como el estrato socioeconómico predominante, su ubicación y el uso que se le da al agua.[8].

Tabla 3: Clasificaciones típicas de los nodos en el análisis por demandas desconocidas

Por estratos	Por Usos	Por zonas topológicas
1	Residencial	Urbanos
2	Comercial	Rurales
3	Institucional	Subredes
4	Oficial	

4.2.2.2 Análisis por emisores

Durante la modelación de una red de distribución, las fugas dentro del sistema son consideradas como emisores, estos se definen como dispositivos asociados a los nodos e la red que permite modelar el flujo de salida a través de una tubería. En el proceso de calibración se determinan los valores aproximados del coeficiente emisor para simular las fugas en la red.[8].

Tabla 4. Clasificaciones típicas de los nodos en el análisis por emisores

Estratos	Usos	Zonas top.	Presión	Material
1	Residencial	Urbanos	Baja	A.C.
2	Comercial	Rurales	Media	P.V.C.
3	Institucional	Subredes	Alta	H.F
4	Oficial		Muy alta	H.G

4.2.3 LINEA DE BASE 2

En este nuevo escenario se recopilan los resultados obtenidos por medios de los análisis por demandas desconocidas y emisores, esto se hace con el fin de aproximar o ajustar de una forma inmediata las curvas de masas y tener una buena estimación del comportamiento medido con relación a las curvas de energía.

4.2.3.1 Análisis por perdidas menores

En esta parte se observa el efecto que tiene sobre toda la red de distribución las modificaciones generadas por los accesorios y demás elementos que al interactuar con el agua ocasionan perdidas de energía

4.2.3.2 Análisis por rugosidades

Por medio de este análisis se busca realizar una observación de las modificaciones generadas por el efecto de los cambios de rugosidades en las tuberías sobre el comportamiento hidráulico del sistema. Estos escenarios son construidos en base al material y a la velocidad del flujo.

4.2.3.3 Análisis por diámetros

Por medio de este análisis se puede observan los efectos producidos sobre el sistema debido a las variaciones en los diámetros que se presentan en algunas ocasiones en las tuberías debido al flujo de agua, así mismo como los errores en la red presentados por las variaciones topológicas de las tuberías.

4.2.4 MODELO UNIFICADO

Luego de realizar los análisis correspondientes a la línea de base 2, se toman los escenarios que obtienen un mejor ajuste para unificarlo en un solo modelo que albergue los escenarios de calibración que manifiesten el comportamiento hidráulico real de la red de distribución.

4.3 MAXIMIZACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO

El propósito de esta metodología es el de lograr minimizar el rango de presiones a la presión mínima solicitada en los nodos de consumo y al mismo tiempo uniformizar el estado de presiones en toda la red de distribución, para lograr esto es necesario maximizar el Índice de Resiliencia, en otras palabras, lo que se busca es que la energía disipada por el sistema sea igual o aproximada a la energía disponible para disipar.

4.3.1 Maximizar el índice de resiliencia

Para maximizar el índice de resiliencia se pueden utilizar las siguientes alternativas:

- Aumentar los diámetros.
- Adicionar depósitos
- Adicionar bombas

El aumentar los diámetros de las tuberías es un buen método para maximizar el Ir debido a que el diámetro de los tubos influye directamente en las pérdidas por fricción que presente una red. Por ende, será la opción a utilizar para el desarrollo de esta metodología.

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

El índice de resiliencia es adimensional y tiene un rango de valores que varía entre 0 y 1.

4.3.2 Maximizar el coeficiente de uniformidad de presiones.

Para poder establecer el plano óptimo de presiones es necesario minimizar las pérdidas técnicas, sin afectar de forma significativa el volumen total de agua entregado y facturado, todo esto sin dejar de cumplir los niveles mínimos de presión establecidos por las normas (15 mca). Por consiguiente se puede analizar como una medida de mejoramiento para la optimización de redes de distribución.

Araque (2006) [3] proponen esta fórmula para estimar el coeficiente de uniformidad de presiones.

$$CU = \frac{\sum_{j=1}^{n_n} p_j}{n_n \max\{p_j\}} = \frac{\bar{p}}{\max\{p_j\}}$$

Donde p_j es la presión del nodo j , n_n el número de nodos y \bar{p} la presión promedio en los nodos. De este modo, se puede deducir que:

$$\bar{p} \leq \max\{p_j\} \text{ entonces } 0 \leq CU \leq 1$$

Teniendo las dos medidas sustitutivas de confiabilidad, ambas adimensionales, y que varían entre 0 y 1.

4.3.3 Definición de la función objetivo.

La función objetivo para esta metodología fue desarrollada por medio del método de la suma ponderada exponencial, dado que es un método simple, eficaz, que a su vez es fácil de programar. Se basa en la combinación de varios objetivos en una misma función, con base en parámetros ajustables a las necesidades del usuario para encontrar los resultados requeridos. La fórmula es la siguiente

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

Donde FO es la función objetivo ponderada, Z el número de objetivos presentes en la función, f_i representa la función objetivo i , w_i es un número que representa la importancia que tiene el objetivo i y p es un factor perteneciente al método.

Para este trabajo utilice la función usada por Torres,S.(2011)[14], creada con base en la suma ponderada exponencial, la función a optimizar es la siguiente:

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

Donde I_R es el índice de resiliencia, CU el coeficiente de uniformidad de presiones, w_1 la importancia que se le da a I_R al momento de optimizar la función, w_2 la importancia que se le da a CU al momento de optimizar CU, teniendo en cuenta que siempre $w_1 + w_2 = 1$ y $w_1, w_2 \geq 0$, p es un parámetro propio del método.

4.3.4 Función de costos

Gutierrez.G(2002)[7]. Propuso una función de costos en base a una estimación en la cual para rehabilitar una tubería es necesario tener una zanja de 1 metro de profundidad y 80 cm de ancho, además de unas cantidades específicas de base granular, arena y un material de relleno, que en este caso es el recebo común, a continuación las cantidades utilizadas de estos materiales para realizar la rehabilitación de tuberías de distintos diámetros. Estas cantidades están dadas en m^3 .

Tabla 5. Cantidades de materiales en m^3 .

	Tuberías				
	4 pulg.	6 pulg.	8 pulg.	10 pulg.	12 pulg.
Arena	0.272	0.262	0.248	0.229	0.207
Base granular	0.160	0.160	0.160	0.160	0.160
Recebo	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400

Con estas cantidades el autor elaboró un análisis de precios unitarios para cada diámetro de tubería, el análisis por metro lineal de construcción es el siguiente:

Tabla 6. Análisis de precios unitarios. Año 2002

TUBERIA 4 PULGADAS				
	Unidad	Precio unitario	Cantidad	Precio
Base granular	m3	\$ 33,500.00	0.16	\$ 5,360.00
arena	m3	\$ 24,200.00	0.27	\$ 6,534.00
Recebo	m3	\$ 25,000.00	0.4	\$ 10,000.00
Mno de obra	hc	\$ 8,820.00	3.6	\$ 31,752.00
Tuberia	mtl	\$ 22,933.00	1	\$ 22,933.00
			Total	\$ 76,579.00

TUBERIA 6 PULGADAS				
	Unidad	Precio unitario	Cantidad	Precio
Base granular	m3	\$ 33,500.00	0.16	\$ 5,360.00
arena	m3	\$ 24,200.00	0.26	\$ 6,292.00
Recebo	m3	\$ 25,000.00	0.4	\$ 10,000.00
Mno de obra	hc	\$ 8,820.00	3.6	\$ 31,752.00
Tuberia	mtl	\$ 49,680.00	1	\$ 49,680.00
			Total	\$ 103,084.00

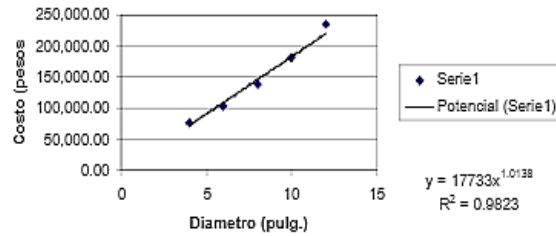
TUBERIA 8 PULGADAS				
	Unidad	Precio unitario	Cantidad	Precio
Base granular	m3	\$ 33,500.00	0.16	\$ 5,360.00
arena	m3	\$ 24,200.00	0.25	\$ 6,050.00
Recebo	m3	\$ 25,000.00	0.4	\$ 10,000.00
Mno de obra	hc	\$ 8,820.00	3.6	\$ 31,752.00
Tuberia	mtl	\$ 84,521.00	1	\$ 84,521.00
			Total	\$ 137,683.00

TUBERIA 8 PULGADAS				
	Unidad	Precio unitario	Cantidad	Precio
Base granular	m3	\$ 33,500.00	0.16	\$ 5,360.00
arena	m3	\$ 24,200.00	0.25	\$ 6,050.00
Recebo	m3	\$ 25,000.00	0.4	\$ 10,000.00
Mno de obra	hc	\$ 8,820.00	3.6	\$ 31,752.00
Tuberia	mtl	\$ 84,521.00	1	\$ 84,521.00
			Total	\$ 137,683.00

TUBERIA 10 PULGADAS				
	Unidad	Precio unitario	Cantidad	Precio
Base granular	m3	\$ 33,500.00	0.16	\$ 5,360.00
arena	m3	\$ 24,200.00	0.23	\$ 5,566.00
Recebo	m3	\$ 25,000.00	0.4	\$ 10,000.00
Mno de obra	hc	\$ 8,820.00	3.6	\$ 31,752.00
Tuberia	mtl	\$ 129,313.00	1	\$ 129,313.00
			Total	\$ 181,991.00

Con los valores obtenidos en los apu's, el autor procedió a conseguir un tipo de regresión que se ajustara a los datos con un buen R² dando como resultado una regresión de tipo potencial.

Figura 8. Costo de construcción 2002 vs diámetro



Como la longitud no afecta el análisis, la ecuación planteada por Gutiérrez fue la siguiente:

$$C_j = 17733L_j * D_j^{1.0138}$$

O la siguiente si se reemplaza el diámetro de las tuberías de pulgadas a milímetros.

$$C_j = 677.61L_j * D_j^{1.0138}$$

Donde C_j es el costo de renovación de una tubería j , L_j y D_j son la longitud y el diámetro de la tubería j , con unidades de metros y milímetros respectivamente. Para una zanja de 1m de profundidad y 80 cm de ancho.

Con base en este análisis, se actualizaron los precios de los materiales empleados para realizar la rehabilitación, pero conservando los mismos valores de la profundidad y ancho de la zanja, al actualizar los precios de los materiales al año 2015, el análisis de precios unitarios quedaron de la siguiente manera.

Tabla 7 Análisis de precios unitarios año 2015

TUBERIA 4 PULGADAS				
	Unidad	Precio unitario	Cantidad	Precio
Base granular	m3	\$ 32,093.00	0.16	\$ 5,134.88
arena	m3	\$ 31,000.00	0.27	\$ 8,370.00
Recebo	m3	\$ 31,800.00	0.4	\$ 12,720.00
Mno de obra	hc	\$ 10,900.00	3.6	\$ 39,240.00
Tuberia	mtl	\$ 30,108.17	1	\$ 30,108.17
			Total	\$ 95,573.05

TUBERIA 6 PULGADAS				
	Unidad	Precio unitario	Cantidad	Precio
Base granular	m3	\$ 32,093.00	0.16	\$ 5,134.88
arena	m3	\$ 31,000.00	0.26	\$ 8,060.00
Recebo	m3	\$ 31,800.00	0.4	\$ 12,720.00
Mno de obra	hc	\$ 10,900.00	3.6	\$ 39,240.00
Tuberia	mtl	\$ 65,741.00	1	\$ 65,741.00
			Total	\$ 130,895.88

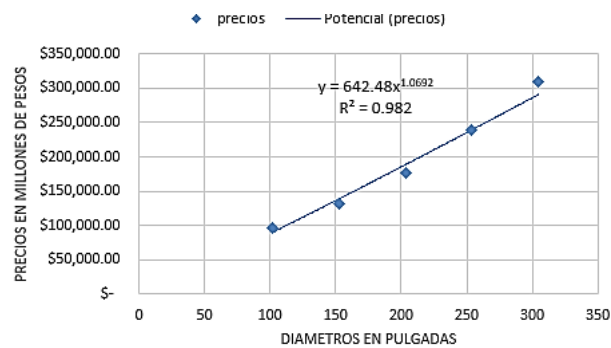
TUBERIA 8 PULGADAS				
	Unidad	Precio unitario	Cantidad	Precio
Base granular	m3	\$ 32,093.00	0.16	\$ 5,134.88
arena	m3	\$ 31,000.00	0.25	\$ 7,750.00
Recebo	m3	\$ 31,800.00	0.4	\$ 12,720.00
Mno de obra	hc	\$ 10,900.00	3.6	\$ 39,240.00
Tuberia	mtl	\$ 111,358.50	1	\$ 111,358.50
			Total	\$ 176,203.38

TUBERIA 10 PULGADAS				
	Unidad	Precio unitario	Cantidad	Precio
Base granular	m3	\$ 32,093.00	0.16	\$ 5,134.88
arena	m3	\$ 31,000.00	0.23	\$ 7,130.00
Recebo	m3	\$ 31,800.00	0.4	\$ 12,720.00
Mno de obra	hc	\$ 10,900.00	3.6	\$ 39,240.00
Tuberia	mtl	\$ 175,300.67	1	\$ 175,300.67
			Total	\$ 239,525.55

TUBERIA 12 PULGADAS				
	Unidad	Precio unitario	Cantidad	Precio
Base granular	m3	\$ 32,093.00	0.16	\$ 5,134.88
arena	m3	\$ 31,000.00	0.25	\$ 7,750.00
Recebo	m3	\$ 31,800.00	0.4	\$ 12,720.00
Mno de obra	hc	\$ 10,900.00	3.6	\$ 39,240.00
Tuberia	mtl	\$ 245,279.17	1	\$ 245,279.17
			Total	\$ 310,124.05

Con los precios actualizados y con el diámetro de las tuberías representadas en milímetros, la función de costos actualizada queda de la siguiente manera

Figura 9. Costo de construcción 2015 vs diámetro



Y la ecuación de costos a utilizar en esta metodología queda de la siguiente manera:

$$C_j = 642.48L_jD_j^{1.0692}$$

4.4 DATOS DE ENTRADA DE LA FUNCION OBJETIVO Y FUNCION DE COSTOS.

Los datos de entrada para el algoritmo que maximiza la función objetivo son los siguientes:

- ✓ **Diámetro máximo:** es el valor máximo que puede tomar el diámetro de la tubería a rehabilitar.
- ✓ **Rugosidad:** rugosidad del material que se vaya a utilizar en la rehabilitación de las tuberías en mm.
- ✓ **Presión mínima:** Restricción a la optimización, dado en metros de columna.
- ✓ **K_{costo} y n_{costo}:** Parámetros de la función de costo. (sección 3.3.4)
- ✓ **Costo del agua:** valor un metro cubico de agua en pesos.
- ✓ **P:** parámetro dado por el método. para evitar desbordamiento numérico del algoritmo.
- ✓ **Numero de cambios:** número de tuberías a rehabilitar

Figura 10. Interfaz inicial del algoritmo. [14]

Fuente: Programa creado por Sergio Andrés Torres Martínez en conjunto con el a.m.b S.A E.S.P

4.5 EJECUCIÓN DEL ALGORITMO

Para ejecutar el algoritmo y encontrar una solución óptima que permita encontrar las tuberías prioritarias a rehabilitar, se asignaron los siguientes de valores a w_1 y w_2 .

Tabla 8 Importancias dadas para el Ir y Cu

W1:Ir	W2:Cu
5%	95%
50%	50%
95%	5%

W_1 es la importancia que se le da al índice de resiliencia, en la función objetivo, teniendo en cuenta que el valor para w_2 , ósea la importancia para el CU es $w_2=1-w_1$.

Además de esto se planearon 2 escenarios distintos, donde la variación principal parte de los modelos hidráulicos, se realizaron pruebas al modelo hidráulico inicial, sin ningún tipo de emisores en los nodos de consumo, posteriormente al mismo modelo pero luego de ser calibrado (ver sección 3.2).

Tabla 9. Distribución de importancia de las medidas de confiabilidad

Modelo sin emisores		Modelo Calibrado	
Ir	Cu	Ir	Cu
5%	95%	5%	95%
50%	50%	50%	50%
95%	5%	95%	5%

Los datos de entrada para el algoritmo son los siguientes:

- Diámetro máximo: 500 mm

- Rugosidad: 0.0015
- Presión mínima: 15 mca
- Kcosto: 642.48
- Ncosto: 1.0692
- Costo del agua: 500\$
- P: 350

Para este caso se determinó que las nuevas tuberías que se utilizarían para la rehabilitación serían de PVC, ósea con una rugosidad de 0.0015 mm. La presión de 15 [mca] está basada en la reglamentación del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, el cual debe garantizar esa presión como mínima en cada nodo de consumo de la red.

Los valores de C y a, no se tendrán en cuenta, debido que en el primer escenario planteado es sin emisores, y en el segundo, se tienen emisores locales en ciertos nodos, mientras que estos valores son utilizados si se quiere asignar emisores a toda la red. Por ende no son relevantes en este caso.

5 RESULTADOS

5.1. ANÁLISIS DEL PRIMER ESCENARIO

En este primer escenario, el algoritmo se ejecuta sobre el modelo hidráulico inicial, sin asignarle emisores a los nodos de consumo.

5.1.1 Comportamiento de la red de distribución sector centro.

En la Figura 11 se puede observar que las 3 condiciones planteadas incrementan de manera considerada la resiliencia de la red, siendo la condición de $I_r=95\%$ la que aumenta un poco más la resiliencia con respecto a la condición inicial de cero cambios, a diferencia de la condición $I_r=5\%$ la cual aumenta en menor medida la resiliencia de la red.

Por otro lado, en la figura 12 se puede observar el comportamiento de la uniformidad de la red, arrojando de igual forma que en el gráfico anterior, resultados favorables para las 3 condiciones dadas, teniendo un mayor aumento de la uniformidad de la red la condición. $w3=5\%$. En cambio en este aspecto, la condición $I_r=95\%$ es la que ofrece un menor incremento a la uniformidad de la red.

Figura 11. Índice de resiliencia (50 cambios) $T=24h$

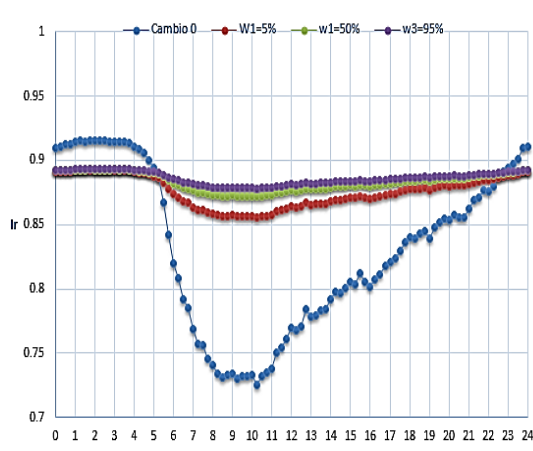
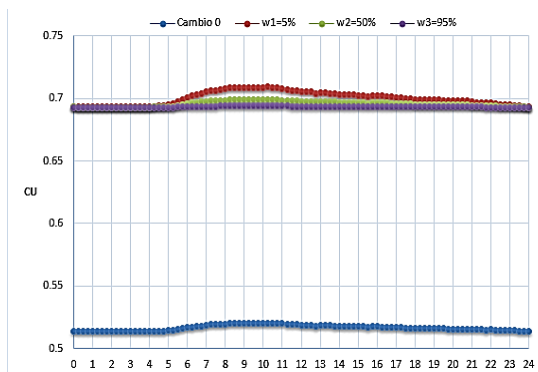


Figura 12. Coeficiente de uniformidad. (50 cambios) T=24h



También se puede analizar el comportamiento del índice de resiliencia y el coeficiente de uniformidad de presiones de la red Vs el número de cambios, así como los costos que se obtendrían al realizar las 50 reposiciones para las 3 condiciones dadas, esta información nos brinda ayuda para escoger cual sería la propuesta de rehabilitación más efectiva y eficiente para este sector.

Figura 13. Ir vs número de cambios

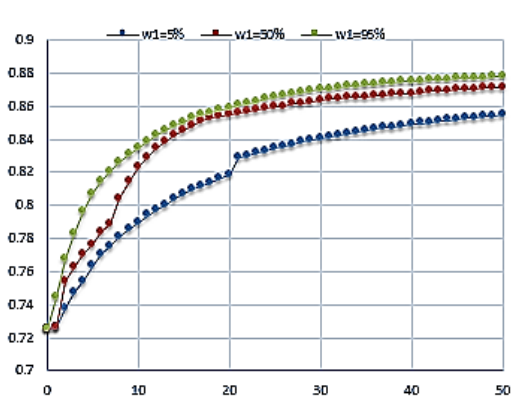


Figura 14. Cu vs número de cambios

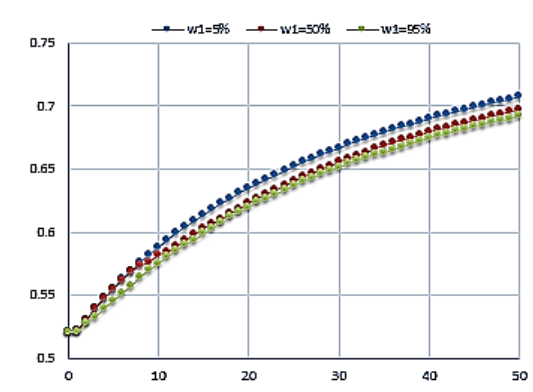
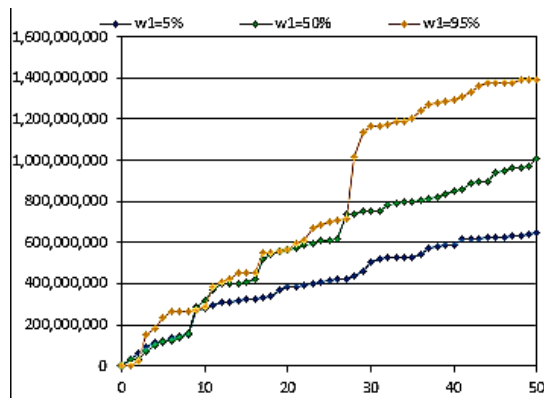


Figura 15. Costo de renovación Vs número de cambios



Dados estos resultados, la condición óptima para escoger las tuberías prioritarias para rehabilitar serían las dadas por la condición $w1=5\%$ debido a que se obtiene una mejoría considerable tanto en la resiliencia de la red (ver figura 13), como en la uniformidad de la misma (ver figura 14), cumpliendo así el objetivo de mejorar el comportamiento de estas medidas de confiabilidad dentro del sistema.

En la Figura 15 se puede observar que la condición escogida $w1=5\%$, tendría un costo total del 600.000 millones de pesos, en comparación con la opción $w1=95\%$ que tiene un coste total de renovación de 1'400.000, una cantidad bastante

considerable teniendo en cuenta que entre las 2 condiciones, no se obtiene una diferencia lo bastante significativa en el comportamiento del índice de resiliencia y el coeficiente de uniformidad.

A continuación, el listado de las tuberías a rehabilitar aumentando el diámetro.

Tabla 10. Listado de tuberías a rehabilitar, aumentando el diámetro. W1=50%

Cambio	ID Tubo	Nuevo Diámetro
1	4647	200
2	52063	300
3	33075	150
4	34469	200
5	33091	75
6	50659	200
7	16595	100
8	4647	250
9	53194	500
10	16595	150
11	4645	150
12	34461	200
13	33133	100
14	33075	200
15	4218	100
16	4615	75
17	4225	100
18	34469	250
19	16240	200
20	34601	200
21	4614	75
22	52063	350
23	33168	150
24	4498	150
25	33169	150
26	33129	150
27	33133	150
28	34615	100
29	16535	200
30	52159	200
31	16247	100
32	34341	100
33	32142	150
34	4225	150
35	32288	150
36	34615	150
37	52158	200
38	4647	300
39	4645	200
40	16247	150

Cambio	ID Tubo	Nuevo Diámetro
41	51594	200
42	4646	150
43	16694	150
44	33075	250
45	52162	100
46	4224	100
47	38189	100
48	33091	100
49	34516	100
50	5480	75

5.1.2 Comportamiento de la red de distribución sector morro alto

En la figura 16 se contempla como las 3 condiciones de importancia para el índice de resiliencia dadas para el método incrementan la resiliencia del sistema, aunque la condición que mejora un poco más esta medida sustitutiva de confiabilidad es la dada por $w_1=95\%$, aunque el aumento en este índice no va más allá del 10%.

Acto seguido, en la figura 17, se nota como el coeficiente de uniformidad del sistema mejora en un pequeño porcentaje para las tres alternativas planteadas, pero en este caso, es la importancia dada de $w_1=95\%$, la que mejores resultados produce en la uniformidad de presiones de la red, aunque las otras 2 alternativas, también se pueden considerar como favorables para esta medida de confiabilidad.

Al analizar el comportamiento de las curvas en las figuras 16 y 17, se puede observar como la condición $w_1=50\%$, es la que brinda una mejoría notable en los dos índices de confiabilidad analizados, aunque en ninguno de los 2 presente el pico máximo, aunque en este modelo sin calibrar, los incrementos en la confiabilidad de la red no son tan considerables.

Figura 16. Índice de resiliencia (50 cambios) T=24h

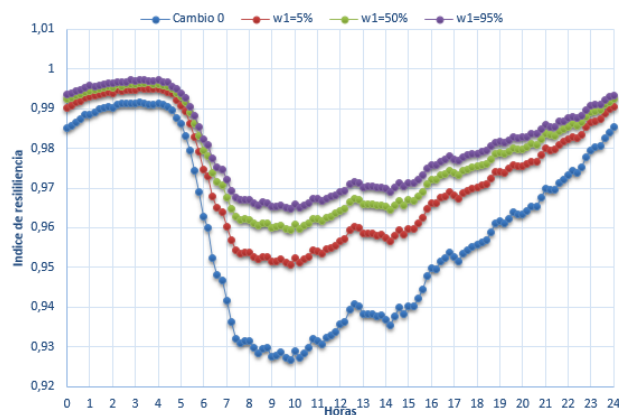
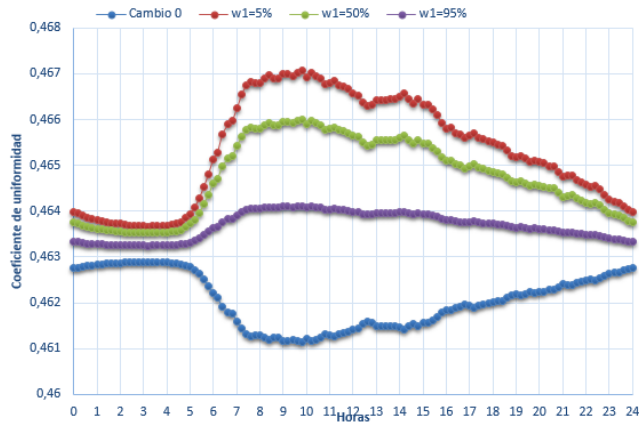


Figura 17. Coeficiente de uniformidad. (50 cambios) T=24h



Al analizar el comportamiento del índice de resiliencia y el coeficiente de uniformidad de presiones respecto al número de cambios, se puede escoger el resultado que incremente en mayor medida los dos índices de confiabilidad utilizados, así como el costo acumulado de las tres alternativas planteadas, esta información es importante para escoger el listado de las tuberías prioritarias a rehabilitar.

Figura 18. Ir vs número de cambios

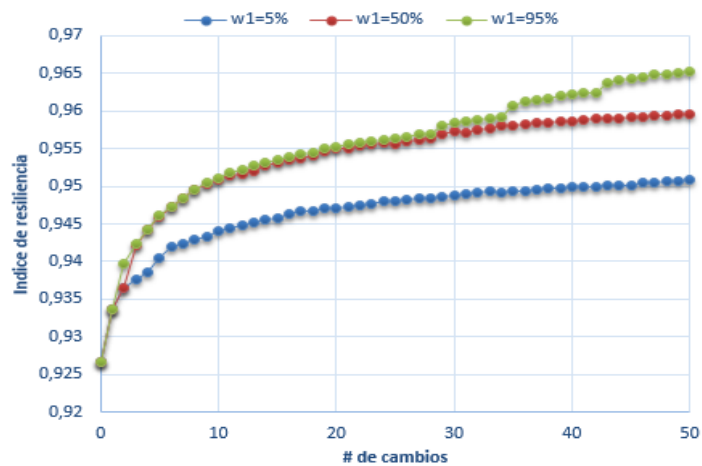


Figura 19. Cu vs número de cambios

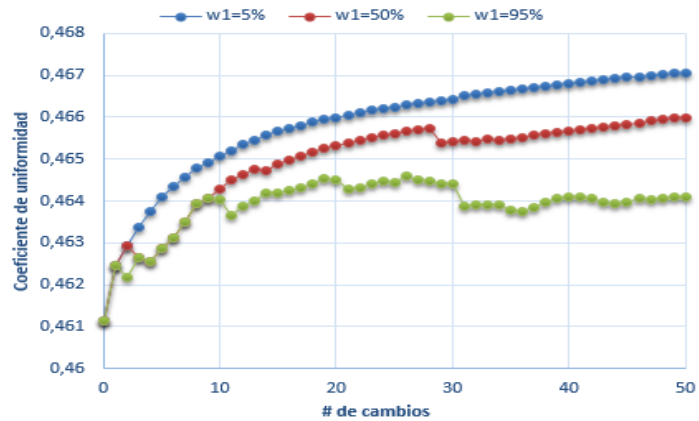
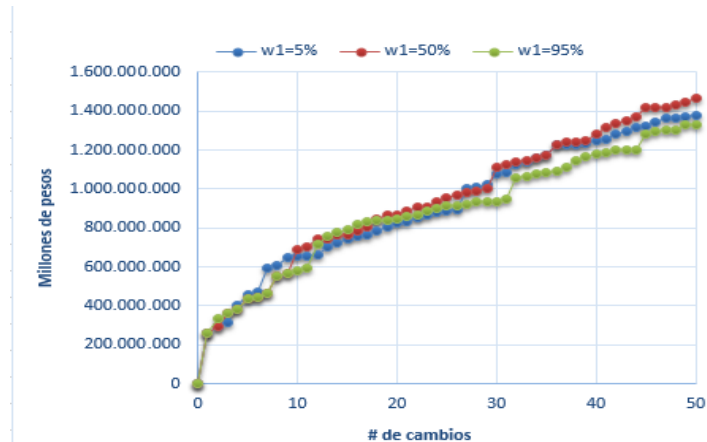


Figura 20. Costo acumulado de renovación vs número de cambios



Con estos resultados obtenidos, La alternativa que mejora de forma gradual tanto la resiliencia de la red, como el coeficiente de uniformidad de presiones, es la dada por la importancia de $w1=50\%$ que representa una importancia media para el índice de resiliencia.

En la figura 20, se puede observar que el costo de renovación de las tres opciones de renovación encontradas, tienen un comportamiento similar, en este caso, el costo

de renovación de las tuberías a priorizar es de alrededor de 1.400 millones de pesos.

Tabla 11. Listado de tuberías a rehabilitar, aumentando el diámetro. W1=50%

Cambio	ID Tubo	Nuevo Diámetro
1	55806	450
2	55806	500
3	30153	250
4	54059	250
5	55807	400
6	55807	450
7	53875	300
8	54059	300
9	56920	200
10	55807	500
11	53892	250
12	30153	300
13	5690	300
14	54059	350
15	53875	350
16	54096	400
17	54096	450
18	30079	250
19	51345	300
20	54059	400
21	30153	350
22	53875	400
23	30078	200
24	29838	200
25	5690	350
26	54096	500
27	19363	500
28	56920	250
29	54060	150
30	53927	300
31	53927	350
32	29478	200
33	53990	200
34	54059	450
35	30031	200
36	30037	300
37	30363	200

Cambio	ID Tubo	Nuevo Diámetro
38	30363	250
39	29478	250
40	29477	200
41	53892	300
42	30243	300
43	53927	400
44	53875	450
45	30153	400
46	5699	150
47	54059	500
48	53990	250
49	30031	250
50	29478	300

5.2. análisis del segundo escenario

En este escenario, a diferencia del primero, se consideran unos emisores locales debido al proceso de calibración, la calibración busca que el modelo hidráulico asemeje las condiciones reales a las que se encuentra sometida la red de distribución. (Ver sección 3.2)

5.2.1. Comportamiento de la red de distribución sector centro.

Con el modelo calibrado, se obtiene una mejoría en la resiliencia y la uniformidad de la red en la condición inicial de 0 cambios, Al igual se obtienen resultados favorables para las tres condiciones de importancia dadas para $w1$.

En la figura 21 se puede observar los resultados con respecto al índice de resiliencia. Se obtiene una mejora hasta del 20% en la hora de mayor consumo para cualquiera de las 3 condiciones, ya que no existe un aumento considerable entre las 3, si no que oscilan entre el mismo rango de valores, incluso las condiciones $w1=50\%$ y $w1=95\%$ se traslapan, arrojando los mismo resultados.

Por otra parte, en la figura 122 se puede observar el comportamiento de la uniformidad de la red, en este caso se obtiene una mejora considerable de la uniformidad en el transcurso de todo el día, cerca del 30 %, realizando los 50 cambios en la red.

Figura 21. Índice de resiliencia (50 cambios) T=24h

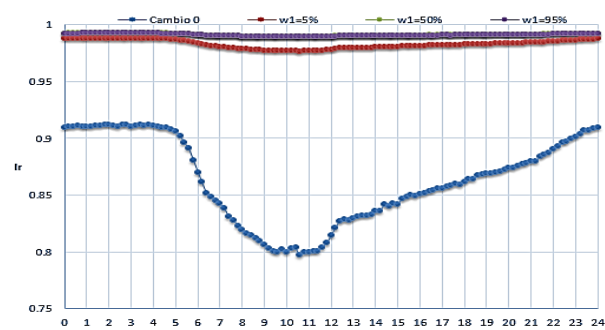
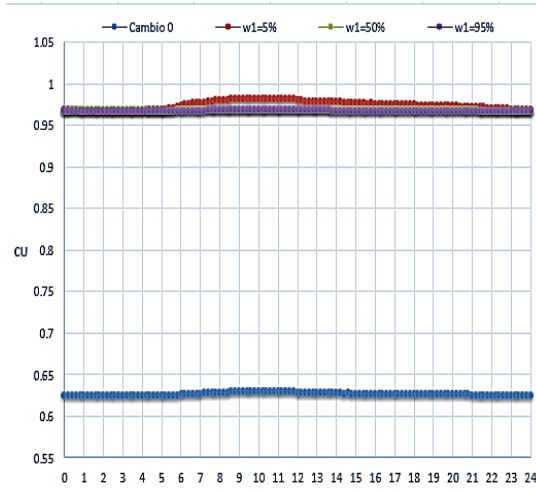


Figura 22. Coeficiente de uniformidad. (50 cambios) T=24h



Al analizar el comportamiento de las medidas sustitutivas de confiabilidad vs el número de cambios, que las 3 condiciones de importancia brindan una solución óptima al problema, la 3 posibilidades aumentan en proporciones parecidas tanto el índice de resiliencia como el coeficiente de uniformidad de presiones, en la figura 21 se puede observar como al hacer el cambio número 50 se logra mejorar el índice de resiliencia en un 30% con respecto a la condición inicial de 0 cambios.

En el coeficiente de uniformidad también se obtiene un resultado favorable, ya que se mejora en un 20% con respecto a la condición inicial.(ver figura22)

Figura 23. Ir vs número de cambios

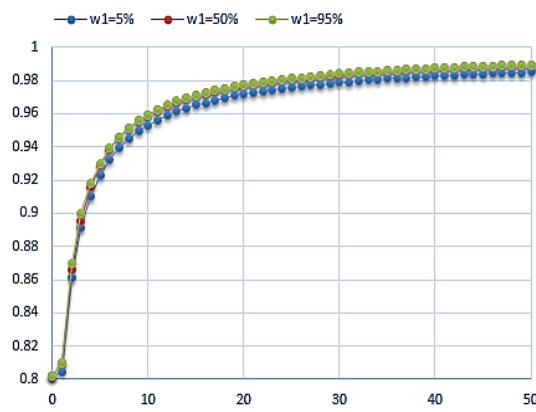
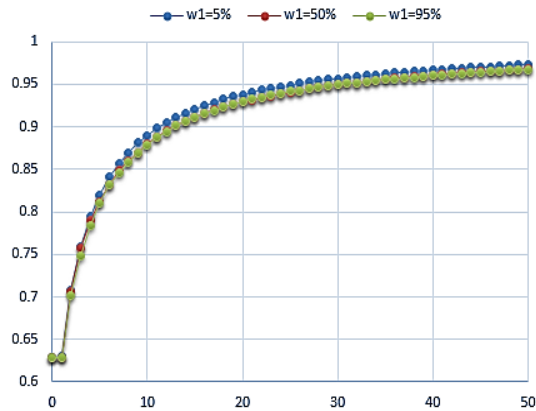
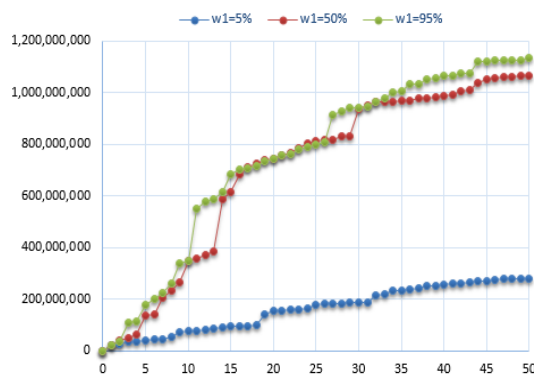


Figura 24. Cu Ir vs número de cambios



Debido a que para las tres condiciones de importancia para la resiliencia (w_1) se obtuvieron resultados parecidos, es necesario mirar el comportamiento de las tres alternativas con respecto al costo para escoger la solución que mejore la confiabilidad de la red, pero que además sea lo más económica posible. Esto se puede analizar en la siguiente gráfica.

Figura 25. Costo de renovación Vs número de cambios modelo calibrado



Se puede notar claramente como la solución brindada por la opción $w_1=5\%$ es mucho más económica, cerca de un 70% en comparación de las otras opciones, y esto se debe a que esta alternativa prioriza la renovación en tubos de diámetros pequeños, que al cambiarlos por un diámetro más grande se puede obtener un

resultado óptimo a un bajo costo. El listado de las tuberías a rehabilitar es el siguiente:

Tabla 12. Listado de tuberías a rehabilitar, aumentando el diámetro. W1=5%

Cambio	ID Tubo	Nuevo Diámetro
1	4646	150
2	4647	200
3	16595	75
4	16596	100
5	33133	75
6	4218	75
7	33133	100
8	32791	150
9	16728	150
10	4225	75
11	4226	100
12	16247	75
13	16248	100
14	4647	250
15	32934	75
16	32942	75
17	32943	100
18	32934	100
19	52198	150
20	16535	150
21	32943	150
22	32934	150
23	33073	75
24	16728	200
25	52198	200
26	4218	100
27	33073	100
28	4150	75
29	33133	150
30	4224	75
31	4648	150
32	52063	300
33	32791	200
34	34469	150
35	4150	100
36	16595	150
37	34457	75
38	32921	75
39	32922	100
40	32924	150

Cambio	ID Tubo	Nuevo Diámetro
40	32924	150
41	33083	150
42	16535	200
43	34457	100
44	32808	75
45	4225	150
46	4508	75
47	4509	100
48	4224	100
49	33090	75
50	33091	100

5.2.2. Comportamiento de la red de distribución sector morro alto

En el modelo calibrado, la como el coeficiente de uniformidad inicial con respecto a la condición de 0 cambios es parecida, aunque en este modelo el porcentaje de mejora en el índice de resiliencia es un poco mayor que en el modelo anterior.

En la figura 26 se nota claramente como la resiliencia de la red en este modelo mejora alrededor del 12% con respecto a la condición de 0 cambios en la hora de mayor consumo.

Por otra parte, en la figura 27, se puede observar que solo una de las 3 alternativas planteadas como solución para la rehabilitación de tuberías mejora el coeficiente de uniformidad de presiones ($w1=5\%$), mientras que las otras 2 opciones ($w1=50\%$ y $w2=95\%$), no favorecen este indicador.

Figura 26. Índice de resiliencia (50 cambios) T=24h

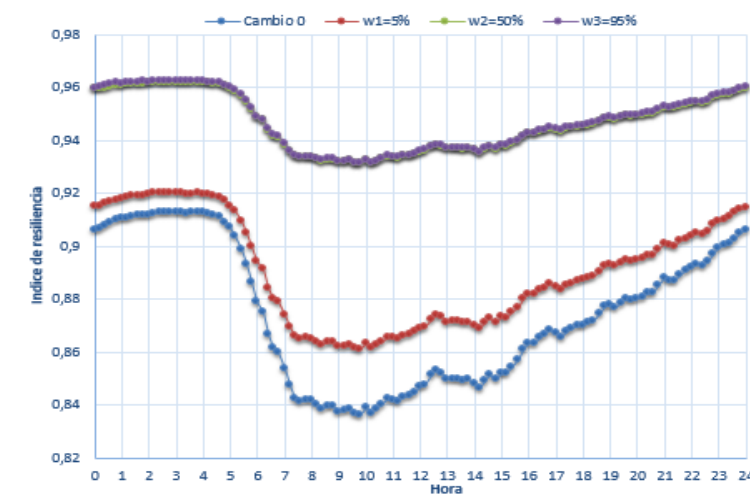
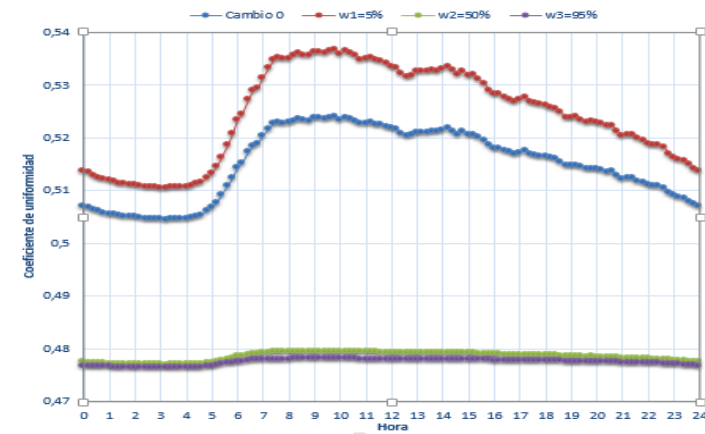


Figura 27. Índice de resiliencia (50 cambios) T=24h



En las figuras 28 y 29, se puede observar el comportamiento del índice de resiliencia y el coeficiente de uniformidad de presiones con respecto al número de cambios que se realicen en el sistema, que para este caso es de 50.

En la figura 28 Ir aumenta de forma gradual a medida se realice un mayor número de cambios en la red, pero de las 3 alternativas, solo las opciones w1=50% y w11=95%, traen una mejora en la resiliencia hasta del 10% con respecto a la otra alternativa, aunque la opción w1=5% también mejora este índice aunque en un porcentaje menor.

En la figura 29, Se nota como el coeficiente de uniformidad mejora únicamente con la opción w1=5%, las otras 2 alternativas disminuyen este coeficiente a medida que aumente el número de cambios en la red.

Figura 28. Ir vs número de cambios

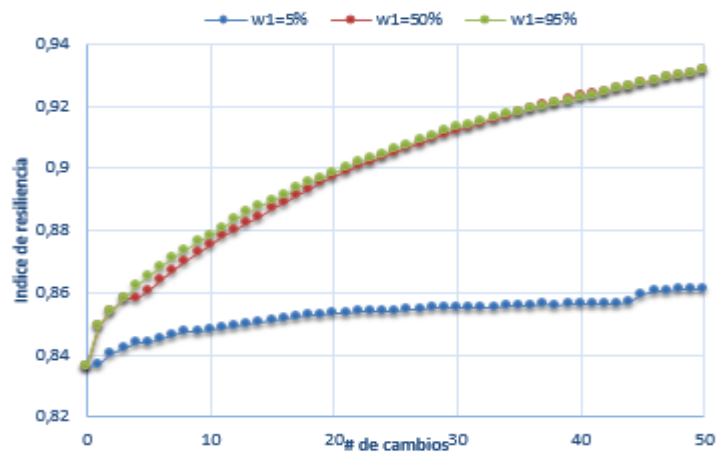
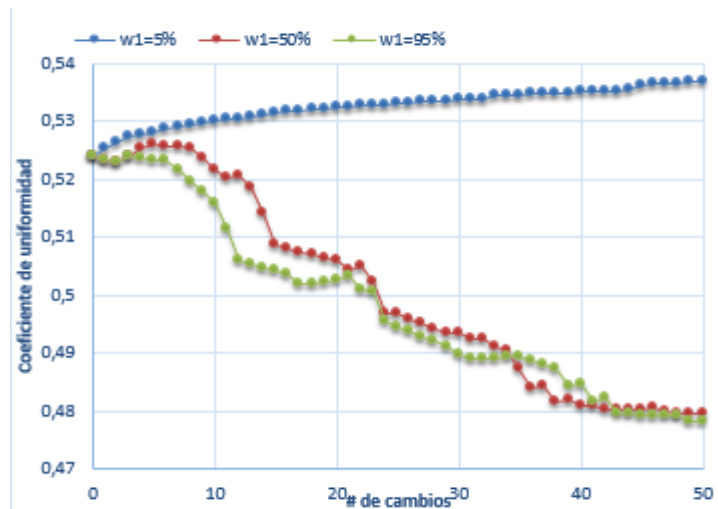
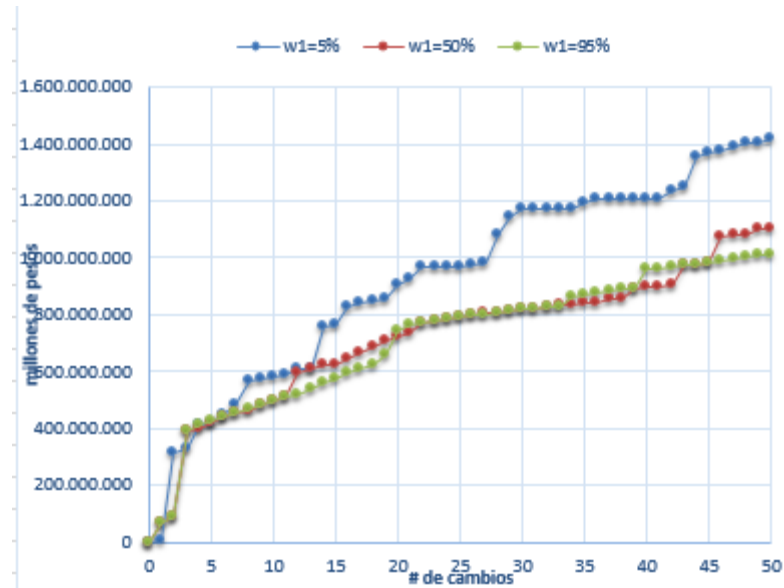


Figura 29. Cu vs número de cambios



En este caso, la única opción que mejora las dos medidas sustitutivas de confiabilidad es la alternativa $w1=5\%$, que mejora tanto el índice de resiliencia como el coeficiente de uniformidad de presiones, aunque las otras 2 alternativas mejoran en un mayor porcentaje el Ir, no ocurre lo mismo con el Cu, disminuyendo su valor de forma considerable.

Figura 30. Costo de renovación Vs número de cambios modelo calibrado



En la figura 30 se nota claramente que la opción escogida para el problema ($w1=5\%$) tiene un precio de renovación acumulado de aproximadamente 1.400 millones de pesos, pese a que las otras 2 alternativas son más económicas, la opción escogida le trae mejores beneficios al sistema desde el punto de vista hidráulico.

A continuación, el listado que contiene los indicadores de las tuberías a rehabilitar dentro de la red morro alto.

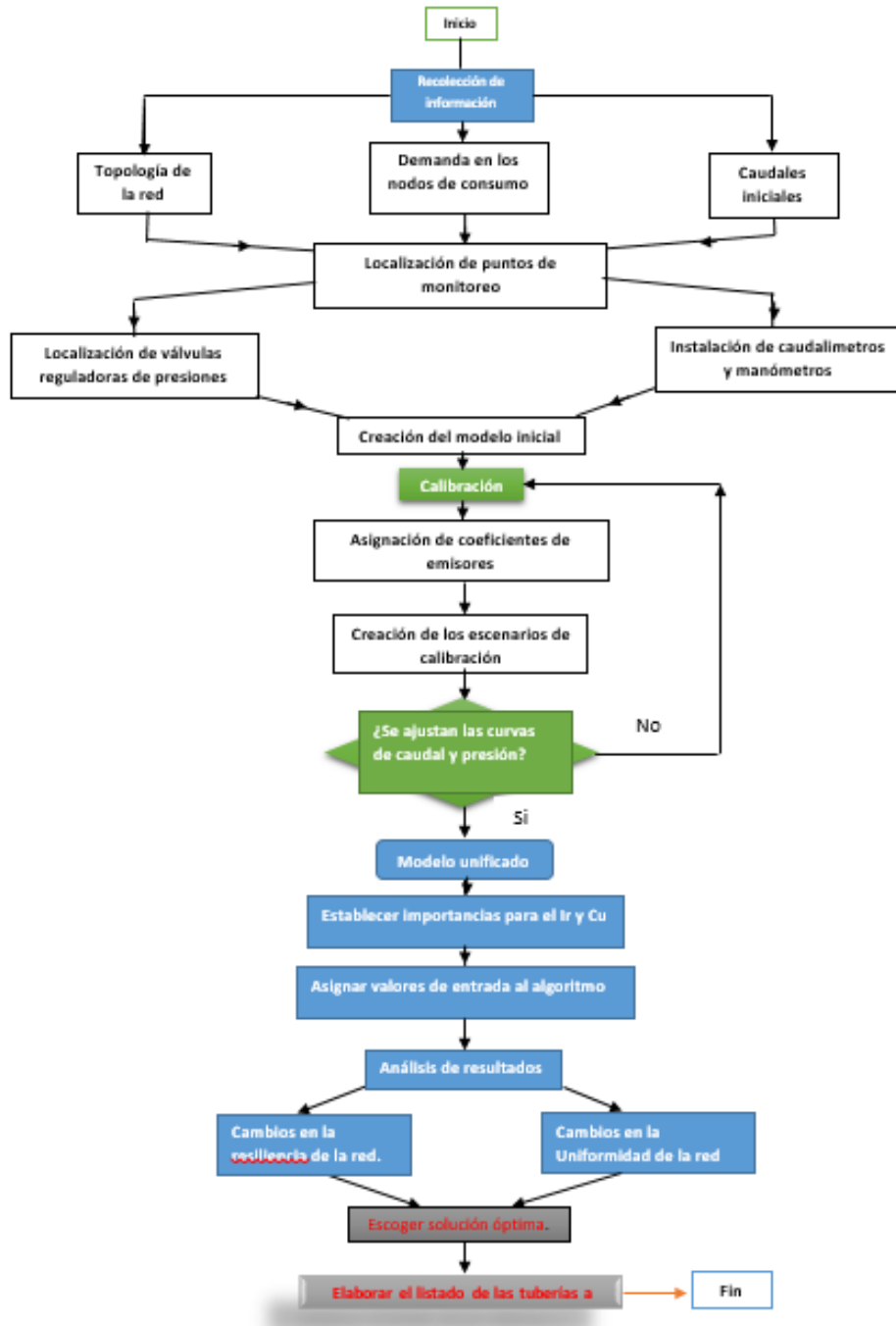
Tabla 13. Listado de tuberías a rehabilitar, aumentando el diámetro. W1=5%

Cambio	ID Tubo	Nuevo Diámetro
1	28969	75
2	55806	450
3	30153	200
4	25848	450
5	18092	75
6	56920	150
7	55806	500
8	54059	200
9	18093	75
10	25848	500
11	30153	250
12	54059	250
13	53892	200
14	53875	300
15	28969	100
16	55807	400
17	56920	200
18	55807	450
19	27442	75
20	5690	300
21	54059	300
22	39160	200
23	18091	75
24	18316	75
25	27440	75
26	55807	500
27	30153	300
28	34773	300
29	53927	300
30	53875	350
31	18092	100
32	18315	50
33	18315	75
34	18090	75
35	34773	350
36	29477	150

Cambio	ID Tubo	Nuevo Diámetro
37	53892	250
38	27441	75
39	27442	100
40	18093	100
41	18315	100
42	51345	300
43	48704	450
44	19363	400
45	19363	450
46	19363	500
47	56920	250
48	53927	350
49	V_5850	75
50	30079	200

5.3. DIAGRAMA DE FLUJO METODOLOGIA

Figura 31. Diagrama de flujo metodología.



6. CONCLUSIONES

- 6.1. Es importante desarrollar metodologías donde se mejore la confiabilidad de las redes, con el fin de garantizar unas condiciones mínimas de operación cuando se presenten fallas en la red.
- 6.2. Esta metodología es aplicable en modelos que se encuentren previamente calibrados, de este modo los resultados obtenidos serán más precisos y confiables.
- 6.3. Esta metodología fue creada para modificar un instructivo que hace parte del sistema de gestión de la calidad del el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.
- 6.4. En el sector centro, el índice de resiliencia y el coeficiente de uniformidad de presiones, aumentan en porcentajes considerables para la condición de importancia IR de 5% en los escenarios planteados, pero obteniendo mejores resultados tanto en la confiabilidad de la red, como en los costos en el modelo calibrado.
- 6.5. Comparando los modelos iniciales, el comportamiento del Ir y Cu durante el día varían entre el modelo calibrado y el modelo sin calibrar en un porcentaje del 10% en la hora de mayor consumo respecto a la condición de 0 cambios, por ende, al aumentar los diámetros de las tuberías a rehabilitar para mejorar la confiabilidad de la red se obtiene un mayor beneficio en el modelo previamente calibrado, sobre todo en la uniformidad, ya que se obtiene un beneficio del 30%, mientras que en el modelo sin calibrar, el beneficio es solo del 20%.

- 6.6.** En este caso se escogió un número de cambio igual a 50, porque es el punto donde las gráficas del índice de resiliencia y coeficiente de uniformidad tienden a estabilizarse, es decir, si se hubiese escogido un número de cambios mayor a 50, el porcentaje de beneficio obtenido no tendría una variación considerable.
- 6.7.** Para la condición $w_1=5\%$ escogida para los modelos de centro sin calibrar y centro calibrado los costos de las tuberías a rehabilitar es de aproximadamente 600'000.000 y 300'000.000 millones de pesos respectivamente, el porcentaje de incremento es cercano al 100%, un porcentaje bastante alto teniendo en cuenta que en el análisis del modelo calibrado se obtienen mayores beneficios en la confiabilidad del sistema.
- 6.8.** La alternativa escogida en el sector morro alto, fueron distintas, debido a que el comportamiento de las medidas sustitutivas de confiabilidad, tuvieron un comportamiento distinto entre el modelo calibrado y el modelo sin calibrar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ALONSO GUZMAN, 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 a la ciudad de valencia. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.

[2] ALONSO GUZMAN, Carlos D., IZQUIERDO, Sebastián Joaquín., PEREZ GARCIA, Rafael., HEERRERA FERNANDEZ, Manuel. Factores de fiabilidad y eficiencia en la toma de decisiones para la rehabilitación de tuberías. Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XIV (número 4). Enero de 2013.

[3] ARAQUE FUENTES, Diego A. Optimización de redes con el fin de uniformizar el estado de presiones. Bogotá, 2006. Trabajo de grado (Magister en Ingeniería Civil). Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

[4] ARAQUE FUENTES, Diego A. SALDARRIAGA, Juan Guillermo. Optimización operacional de redes de distribución de agua potable con el fin de maximizar la uniformidad de presiones en los nodos de consumo. En revista de ingenieira , Universidad de los Andes. #22, (2005); p 126-132.

[5] CHEUNG, Peter B. Análise de reabilitação de redes de distribuição de água para abastecimento via algoritmos genéticos multiobjetivos. Trabajo de grado (Doctor en hidráulica y saneamiento). São Paulo. 2004. Universidad de São Paulo. Escuela de Ingeniería de São Carlos.

[6] EPA. Manual de EPANET 2.0 Programa para calculo hidráulico. Environmental Protection Agency, 2001.

[7] GUTIERREZ, Gabriel. Diseño optimo de redes bajo ambiente de fugas. 2002. Trabajo de grado. Universidad de los Andes. Departamento de ingenieria civil y ambiental.

[8] LUCENA GUTIERREZ, Claudia T; RINCON SUAREZ, Abner A. Creación de un modelo de red matriz para el acueducto metropolitano de Bucaramanga. Bucaramanga, 2012. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil.

[9] RAAD, Darian N. Multi-objective optimization of water distribution systems desing using metaheuristics. Tesis Doctoral. (Investigación de Operaciones). Stellenbosch (Sudáfrica), 2011. Universidad de Stellenbosh. Facultad de Economía y ciencias de la administración. Departamento de Logística.

[10] SALDARRIAGA, Juan; Jurado, Julio Cesar. Metodolia de calibracion de redes de distribución de agua potable. En: XVIII Seminario Nacional de Hidraulica e Hidrologia. Bogotá. 2008.

[11] SALDARRIAGA, Juan G; SALAS, Daniel E. Calibración de redes de distribución de agua potable bajo un ambiente de fugas. En Seminario Internacional La Hidroinformática en la Gestión Integrada de los recursos hídricos. Bogotá, P 225-233.

[12] SALDARRIAGA, Juan G. SERNA, Manuel & Arbelaez. Juliana. Diseño de redes de distribución incluyendo el concepto de resiliencia. En: XXVIII SEMINARIO NACIONAL DE HIDRAULICA E HIDROLOGIA. (2008). Bogotá.

[13] TODINI, Ezio. Looped water distribution networks designs a resilience index based heuristic approach. En: Urban Water. Vol.2, issue 2 (Junio, 2000); p 115-122.

[14] TORRES MARTINEZ, Sergio A. Optimización del índice de resiliencia y uniformización de la presión como criterios para renovar tuberías en redes de distribución de acueductos, Bucaramanga, 2011. Trabajo de grado. Universidad industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil.