

**INFLUENCIA DE LA CALIBRACIÓN EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA  
POTABLE CON BASE EN UNA METODOLOGÍA DE REPOSICIÓN Y  
REFORZAMIENTO MAXIMIZANDO LA UNIFORMIZACIÓN DEL PLANO DE  
PRESIONES DE UNA RED PILOTO DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA.**

**JAIME HERNÁN MARTÍNEZ PLATA**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2015**

**INFLUENCIA DE LA CALIBRACIÓN EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA  
POTABLE CON BASE EN UNA METODOLOGÍA DE REPOSICIÓN Y  
REFORZAMIENTO MAXIMIZANDO LA UNIFORMIZACIÓN DEL PLANO DE  
PRESIONES DE UNA RED PILOTO DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA.**

**JAIME HERNÁN MARTÍNEZ PLATA**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil**

**Director:**

**MsC. LUIS FERNANDO CASTAÑEDA GALVIS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**2015**

## **AGRADECIMIENTOS**

*Agradezco el apoyo incondicional de mis padres, a la dedicación y los valiosos aportes del ingeniero Luis Fernando Castañeda Galvis y a todos aquellos amigos que me acompañaron este proceso.*

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	13
1. METODOLOGÍA	15
1.1 CALIBRACIÓN DE UNA RED DE AGUA POTABLE	15
1.2 PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN	16
1.2.1 Línea de base 1	16
1.2.2 Línea de base 2	17
1.3 ÍNDICE DE AGUA NO CONTABILIZADA	18
1.4 MODELO UNIFICADO CALIBRADO	19
1.5 ÍNDICE DE RESILIENCIA (IR)	19
1.6 PLANO OPTIMO DE PRESIONES	21
1.7 FUNCIÓN OBJETIVO	22
2. OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN	24
2.1 INFORMACIÓN DE LA RED	24
2.2 MODELO PRELIMINAR	24
2.3 MEDICIÓN PRELIMINAR DE CAUDALES Y PRESIONES	25
2.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO PRELIMINAR	26
2.5 EVALUACIÓN DE MODELOS POR ESCENARIOS	27
2.6 MODELO DEFINIDO	28
2.7 OPTIMIZACIÓN DEL ÍNDICE DE RESILIENCIA	28
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	30
3.1 ANÁLISIS DE IMPORTANCIA	30
3.2 COMPARACIÓN ENTRE MODELOS	33
3.3 MODELO SIN CALIBRAR ESTIMANDO PÉRDIDAS TÉCNICAS	37

3.4 ANÁLISIS DE IMPORTANCIA PARA EL RANGO DE PRESIONES	39
3.5 ANÁLISIS POR CAMBIOS EMPLEADOS	41
4. CONCLUSIONES	44
BIBLIOGRAFÍA	46

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Gráfico de plano de presiones.	22
Figura 2. Modelación EPANET amb para distrito Cañaveral.	25
Figura 3. Obtención de la serie de caudales medida para el distrito Cañaveral amb	26
Figura 4. Metodología de calibración de redes de distribución de agua potable	27
Figura 5. INTERFAZ modelo desarrollado en Visual Basic por Sergio Torres. Universidad Industrial de Santander 2011. Bucaramanga. Colombia.	29
Figura 6. Comparación de importancia del IR según su importancia vs número de cambios en un modelo no calibrado	31
Figura 7. Comparación de importancia del CU según su importancia vs número de cambios en un modelo no calibrado	31
Figura 8. Comparación de importancia del IR según su importancia vs número de cambios en un modelo calibrado	32
Figura 9. Comparación de importancia del CU según su importancia vs número de cambios en un modelo calibrado	32
Figura 10. Comparación entre el IR del modelo calibrado y no calibrado para un 10% de importancia para el IR	33
Figura 11. Comparación entre el CU del modelo calibrado y no calibrado para un 90% de importancia para el IR	33
Figura 12. Comparación entre el IR del modelo calibrado y no calibrado para un 50% de importancia para el IR	34
Figura 13. Comparación entre el CU del modelo calibrado y no calibrado para un 50% de importancia para el IR	34

Figura 14. Comparación entre el IR del modelo calibrado y no calibrado para un 90% de importancia para el IR	35
Figura 15. Comparación entre el CU del modelo calibrado y no calibrado para un 90% de importancia para el IR	35
Figura 16. Comparación para el IR según la condición del modelo analizado	37
Figura 17. Comparación para el CU según la condición del modelo analizado	38
Figura 18. Rango de presiones del distrito Cañaverál a lo largo del número de cambios para el proceso de optimización	40
Tabla 19. Presiones promedio del distrito Cañaverál a lo largo del número de cambios para el proceso de optimización.	40
Figura 20. Numero de cambios propuestos para tuberías. Modelo sin calibrar	42
Figura 21. Numero de cambios propuestos para tuberías. Modelo calibrado	42
Figura 22. Numero de cambios propuestos para tuberías. Modelo sin calibrar estimando pérdidas del 22%	43

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Comparación de resultados mínimos y máximos por modelo analizado	
Parámetros a estudiar: Valores iniciales y finales	36
Tabla 2. Comparación de resultados iniciales y finales por modelo analizado	36
Tabla 3. Comparación de resultados iniciales y finales para el modelo Cañaverál según su condición de análisis	38
Tabla 4. Comparación de resultados de presiones para el distrito Cañaverál sin calibrar y calibrado.	41
Tabla 5. Comparación para los números de cambios empleados según el modelo hidráulico analizado	43

## RESUMEN

**TÍTULO:** INFLUENCIA DE LA CALIBRACIÓN EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE CON BASE EN UNA METODOLOGÍA DE REPOSICIÓN Y REFORZAMIENTO MAXIMIZANDO LA UNIFORMIZACIÓN DEL PLANO DE PRESIONES DE UNA RED PILOTO DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA.\*

**AUTOR:** Jaime Hernán Martínez Plata \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Influencia, calibración, redes, optimización, resiliencia, uniformización.

**DESCRIPCIÓN:** La confiabilidad en las redes de distribución de agua potable como objeto de estudio requiere la búsqueda de metodologías que garanticen la mejora de ésta, evidenciándose problemas en presencia de daños debido a la falta de mantenimiento de las tuberías, existencia de fugas y presencia de conexiones clandestinas que desmejoran la calidad y prestación del servicio. Continuamente se han planteado estudios de calibración para las redes de distribución que han determinado diferenciación entre las características en redes sin calibrar y redes calibradas, demostrando la obtención de resultados más confiables en redes calibradas. Es por eso que se crea la necesidad de realizar la rehabilitación de redes en presencia de condiciones reales con base en las medidas sustitutivas de confiabilidad.

Las redes calibradas presentan ajustes por masas y energía debido a las pérdidas propias, del mismo modo permiten establecer condiciones que ofrece la red, tales como: Estado de micromedidores, detectar zonas con problemas y mantenimiento de la misma, entre otros.

Debido a las características de este tipo de redes, se establecerá un análisis con redes calibradas de tal modo que se determine de forma asertiva la importancia de la influencia en estudios de confiabilidad para redes de distribución de agua potable.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas – Escuela de Ingeniería Civil. Director: Msc. Luis Fernando Castañeda Galvis

## ABSTRACT

**TITLE:** INFLUENCIA DE LA CALIBRACIÓN EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE CON BASE EN UNA METODOLOGÍA DE REPOSICIÓN Y REFORZAMIENTO MAXIMIZANDO LA UNIFORMIZACIÓN DEL PLANO DE PRESIONES DE UNA RED PILOTO DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA.\*

**AUTHOR:** Jaime Hernán Martínez Plata\*\*

**KEY WORDS:** Influence, calibration, networks, optimization, resilience, uniformization.

**Description:** The reliability on the distribution network of drinking water requires as a study goal to find methodologies which will ensure the improvement of potable water and also will expose several problems for damage due to poor maintenance of pipes, leaks and the presence of illegal connection which affect the provision and quality of the service. The calibration studies have been continuously made to the distribution networks that have certain characteristics in differentiation between uncalibrated and calibrated networks showing that the results from the calibrated networks are indeed more reliable. That is why the need for the rehabilitation of networks in the presence of real conditions based on substitute measures of reliability is created.

Calibrated networks have some adjustments by mass and energy as a result of their own losses, but at the same time they allow the establishment of network conditions such as: the state of micrometers, the identification of problematic areas which will require maintenance, among others. Given the characteristics of this type of network, an analysis with calibrated networks will be established with the intention of assertively determine the importance of the influence on reliability studies for distribution networks of drinking water.

---

\*\* Degree work

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering - School of Civil Engineering. Director: Msc. Luis Fernando Castañeda Galvis

## INTRODUCCIÓN

La confiabilidad en las redes de agua potable radica directamente en generar un nivel de servicio adecuado frente a los consumos demandados por los suscriptores propios de la red. Por tal razón, la confiabilidad se basa en diferentes parámetros hidráulicos y topológicos de una red de agua potable, teniendo como efecto en la red un óptimo abastecimiento en términos de caudal y presión.

Como medida de estudio, la confiabilidad se podrá dar al generar una función objetiva en base a dos medidas sustitutivas; Índice de resiliencia y coeficiente de uniformidad.

El proceso de optimización de redes de distribución comprende la maximización de la función objetivo, uniformizando del plano de presiones y promoviendo mayor excedente de potencia a la red, y como consecuencia poder incidir en la positivamente en la confiabilidad de las redes de distribución.

### ***¿Por qué calibrar?***

La calibración es un proceso con muchos productos directos útiles para el manejo y planeación de las redes. Un modelo matemático de la red que se encuentre correctamente calibrado permite investigar la calidad de la operación, medir la fidelidad de los instrumentos de medición, detectar zonas problemáticas en la red, encontrar zonas con altas fugas, detectar fugas mayores, ubicar parámetros de pérdidas de energía y masa y realizar cálculos precisos de modelación hidráulica y de calidad de agua.

Sin calibración, no tiene sentido realizar una modelación de calidad de agua en la red a partir de la cual se desee tomar decisiones para un control detallado de dicha calidad. Tampoco se pueden realizar ampliaciones óptimas de la red. Se ha encontrado que al tener cálculos más precisos, utilizando la calibración se pueden tener ahorros del 40% en la construcción de nuevas redes y ampliaciones.<sup>2</sup>

Ya que este tipo de redes representa de mejor forma las condiciones reales de campo, surge la necesidad de determinar qué tanto influye el uso de redes calibradas en metodologías de optimización de redes de distribución de agua potable.

---

<sup>2</sup>Metodología Calibración Redes Distribución Agua Potable. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/48829940/10-Metodologia-Calibracion-Redes-Distribucion-Agua-Potable>. [Citado el 10 de octubre de 2014].

## 1. METODOLOGÍA

### 1.1 CALIBRACIÓN DE UNA RED DE AGUA POTABLE

En una red de distribución existe un conjunto de 5 parámetros (*Demandas desconocidas, emisores, diámetros, rugosidades y pérdidas menores*), los cuales gobiernan el comportamiento hidráulico de la misma.

El caso de redes que ya se encuentran en funcionamiento, es imposible conocer el verdadero estado de dichas variables, por lo que es necesario realizar un proceso de ajuste a los modelos hidráulicos, para que éstos tengan la capacidad de reproducir correctamente el funcionamiento del sistema localizado en campo. Dicho proceso se conoce como calibración y es indispensable para que el modelo hidráulico de una red de distribución de agua potable sea útil en la toma de decisiones tanto en labores de operación como de mantenimiento.<sup>3</sup>

La metodología de la calibración consiste en pasos definidos para la búsqueda de resultados óptimos y por consecuente en el uso en la toma de decisiones, mantenimiento y prevención:

Se plantea realizar cambios en variables de la red mediante factores multiplicadores con el fin de realizar un ajuste que se asemeje a las condiciones reales de la red. Para esto es necesario realizar diferentes análisis por escenarios de tal modo que los escogidos garanticen la generación de una red debidamente calibrada.

---

<sup>3</sup> Ibid

Para calibrar la red de distribución es necesario conocer la topología detallada de la red. El tipo de materia de las tuberías empleadas, la rugosidad y el diámetro real de las mismas. Asimismo, es necesario conocer los valores para el coeficiente de pérdidas menores de cada accesorio. Obtener datos propios de la red, tales como: Ubicación de las estaciones reguladoras de presión así como datos de micromedición y macromedición en función del tiempo según las demandas reales.

## 1.2 PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN

**1.2.1 Línea de base 1.** Es el ajuste para masas del modelo hidráulico. En el proceso de calibración es necesario asignar demandas desconocidas y emisores.

### **Variables hidráulicas:**

Se trata de variables calculadas durante el proceso de cálculo hidráulico. Son variables físicas que dependen del comportamiento de la fricción y la distribución y pérdidas de masa y energía.<sup>4</sup>

Las variables hidráulicas para el proceso de calibración de la red de agua potable son las siguientes:

- ***Demandas desconocidas:***

Se representa en cantidad agua no reportada por los procesos de micromedición. Es decir, por errores de medición se incurre en pérdidas de agua.

---

<sup>4</sup> SALDARRIAGA, J. G., y SALAS, D. E., “Calibración de redes de distribución de agua potable bajo un ambiente de fugas”, Seminario Internacional La Microinformática en la gestión integrada de los recursos hídricos, Universidad de los andes, Bogotá Dc., Colombia.

- **Emisores:**

Corresponde a la cantidad de agua que se pierde por motivo de daños o imperfecciones propias del sistema. Las pérdidas más comunes son por accesorios y fallas en la red de distribución.

**1.2.2 Línea de base 2.** Análisis que busca ajustar de forma casi definitiva las curvas de masas y tener una buena aproximación al comportamiento medido con relación a las curvas de energía.<sup>5</sup> De este modo poder obtener un modelo definido debidamente calibrado.

**Variables topológicas:**

El ajuste por energía para las redes de distribución de agua potable está dado por este tipo de variables, ya que éstas dependen de las propiedades físicas de las tuberías, su forma, tamaño, posición, sus interconexiones, etc.

- **Diámetros de tubería:**

Hace referencia al diámetro real de las tuberías propias de la red de distribución, pueden sujetarse a cambios continuos a lo largo de tiempo por aparición de biopelícula, incrustaciones e incluso efectos de sedimentación dentro de estas. Es necesario realizar la estimación de diámetros de las tuberías a las cuales se pretende realizar la calibración.

- **Coefficiente de rugosidad:**

La rugosidad está en función del material empleado y se representa en las irregularidades presentes en las tuberías las cuales favorecen las pérdidas de energía dentro de la red de distribución.

---

<sup>5</sup> Metodología Calibración Redes Distribución Agua Potable. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/48829940/10-Metodologia-Calibracion-Redes-Distribucion-Agua-Potable>. [Citado el 10 de octubre de 2014].

- **Coeficiente de pérdidas menores:**

Valor representativo el cual se estima mediante las pérdidas de energía causadas por la fricción en los accesorios y los cambios de alineamiento dentro de la red de distribución.

### 1.3 ÍNDICE DE AGUA NO CONTABILIZADA

El índice de agua no contabilizada consiste en relacionar la información de consumo de una red en el macromedidores que la antecede y comparando con la información que arroja los micromedidores instalados en la residencia de los usuarios y de esta forma contabilizar el agua que no ha sido facturada. Es decir, la diferencia entre el volumen de agua producido por la planta potabilizadora para un sector en particular y la sumatoria de todos los valores micromedidos en el proceso de facturación.

En función del Índice de agua no contabilizada existen dos tipos de pérdidas que influyen directamente; pérdidas comerciales y pérdidas técnicas, adicionalmente se tiene en cuenta un valor para consumos operacionales propios del acueducto.

$$IANC \% = \frac{Vap - Vaf}{Vap} * 100$$

*Ecuacion 1*

**Vap:** *Volumen de agua producido*

**Vaf:** *Volumen de agua facturado*

**Vap y Vaf;** *Son los volúmenes de agua que la empresa produce y factura respectivamente.*

## **1.4 MODELO UNIFICADO CALIBRADO**

Este modelo es una representación del último paso de la calibración.

Consolida en un modelo todos los resultados ajustados de curvas de masa y energía mediante la calibración de la red.

## **1.5 ÍNDICE DE RESILIENCIA (IR)**

Todini (2000) introdujo el concepto de resiliencia como una medida sustitutiva de confiabilidad de las redes de distribución. Está basado en la noción de que las pérdidas de energía interna incrementarán cuando la demanda incremente o cuando ocurran fallos de 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 de tuberías o incrementos de demanda. Es decir, a que tanto excedente de energía hay en la red. Matemáticamente está dado por la presión 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 la red de distribución se le suministra una potencia por unidad de peso llamada potencia por unidad de peso de entrada, cuantificada en términos del caudal y presión que suministran las fuentes de energía.

El índice de resiliencia se define en la siguiente ecuación:

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

*Ecuacion 2*

$P_{int}^{real}$  , 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.<sup>6</sup>

El concepto de maximizar el índice de resiliencia se basa en promover mayor excedente de potencia a la red, de tal modo, garantizar una gestión integral para la red de distribución. A su vez se considera este como medida sustitutiva en función directa de la confiabilidad.

La metodología de optimización del índice de resiliencia y uniformización de la presión como criterios para renovar tuberías en redes de distribución de acueductos.<sup>7</sup> Está basada en aumento de diámetros de tuberías de la red con el objetivo de generar la mayor incidencia en el factor índice de resiliencia.

La resiliencia es posible calcularla con la ayuda de un algoritmo desarrollado en el modelo de Visual Basic, producido para la ejecución de un trabajo de grado en la Universidad Industrial de Santander, algoritmo el cual permite optimizar cualquier red de distribución en base de las medidas sustitutivas de confiabilidad; Y, que a su vez es empleado en el presente estudio.

---

<sup>6</sup> TODINI, Ezio. Looped wáter distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. Urban wáter. Vol. , Issue 2 (Junio, 200)

<sup>7</sup> TORRES MARTÍNEZ, Sergio A. Optimización del índice de resiliencia y uniformización de la presión como criterios para renovar tuberías en redes de distribución de acueductos. 2011 [Pregrado]. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.

Una de las ventajas significativas del programa es la opción como dato de entrada presentada en la interface de ingreso de datos, que permite generar una cantidad de cambios de tuberías en la red de distribución como el usuario lo requiera, con el cual el programa evalúa la más adecuadas para ser cambiadas que produzca aumento del índice en la red, según la cantidad que se haya establecido, este cambia las unidades de tubería a su diámetro comercial inmediatamente al superior y evalúa el índice de resiliencia de los tubos reemplazados.<sup>8</sup>

## 1.6 PLANO OPTIMO DE PRESIONES

Se conoce como plano óptimo de presiones, (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.

Se define el plano óptimo de presiones como aquel plano de presiones que hace minimizar las pérdidas técnicas sin afectar de 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(sic) por presentar valores de presión reducidos y uniformes en cada uno de sus sectores pues de esta forma se minimizan las pérdidas técnicas.<sup>9</sup>

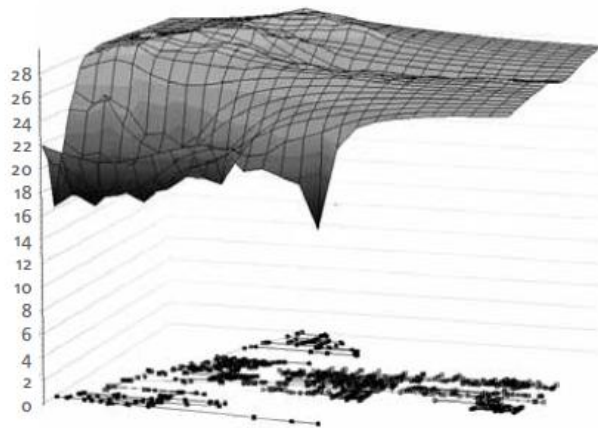
---

<sup>8</sup> LONDOÑO G., Elizabeth, BUSTAMANTE B., Nicolás, BARBOSA M., Samir. Metodología para la rehabilitación de tuberías en redes de distribución de agua potable en el distrito de morro y centro, mediante la uniformización del plano de presiones con base en el índice de resiliencia y empleando curvas de supervivencia. 2012. [Pregrado]. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.

<sup>9</sup> TORRES MARTÍNEZ. Op. Cit.

Asimismo el estado óptimo de presiones proporciona mediante el control de puntos estratégicos la uniformización de presiones, siendo así de gran importancia para evitar fatiga de los materiales de la red, previniendo formación de fugas que contribuyan al aumento del índice de agua no contabilizada.

**Figura 1. Gráfico de plano de presiones.**



Fuente: SALDARRIAGA, J.; OCHOA, S.; MORENO, M.; ROMERO, N.; CORTÉS, O. Renovación priorizada de redes de distribución utilizando el concepto de potencia unitaria. Bogotá, Colombia. 2010. Universidad de los Andes.

## 1.7 FUNCIÓN OBJETIVO

El objetivo en que se basa esta función es el de uniformizar el estado de presiones en toda la red de distribución. Esto se logra maximizando el índice de resiliencia, al encontrar que la energía disipada por el sistema sea igual a la energía disponible para disipar. Mediante modificaciones realizadas a las tuberías escogidas.<sup>10</sup>

---

<sup>10</sup> Ibid

Anteriormente, en el establecimiento de la metodología para la optimización de redes de distribución; se propuso como ejecución de la función objetivo el uso del **Método de Suma Ponderada Exponencial**, el cual basa en la siguiente ecuación:

$$FO = \frac{e^{P*W1} - 1}{P} e^{P*IR} + \frac{e^{P*W2} - 1}{P} e^{P*CU}$$

*Ecuación 3*

Donde:

**IR:** Índice de resiliencia de la red

**CU:** Coeficiente de uniformidad

**W1:** Factor multiplicador de importancia para IR

**W2:** Factor multiplicador de importancia para CU

**P:** Parámetro P; Valor aproximado 350 para evitar desbordamiento del algoritmo

**W1** y **W2** deben ser mayor que 0, además  $W1+W2=1$

## 2. OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN

### 2.1 INFORMACIÓN DE LA RED

Para esta aplicación de la metodología es necesario contar con la modelación preliminar de la red de distribución de agua potable con su respectiva topología.

Para el desarrollo de este paso se definen actividades de asignación de las características propias de cada tubería y accesorios, estas características corresponden a: Diámetros reales internos, diámetros nominales, materiales, edades, fechas de instalación, coeficiente de pérdidas menores, estado de válvulas, entre otros.

### 2.2 MODELO PRELIMINAR

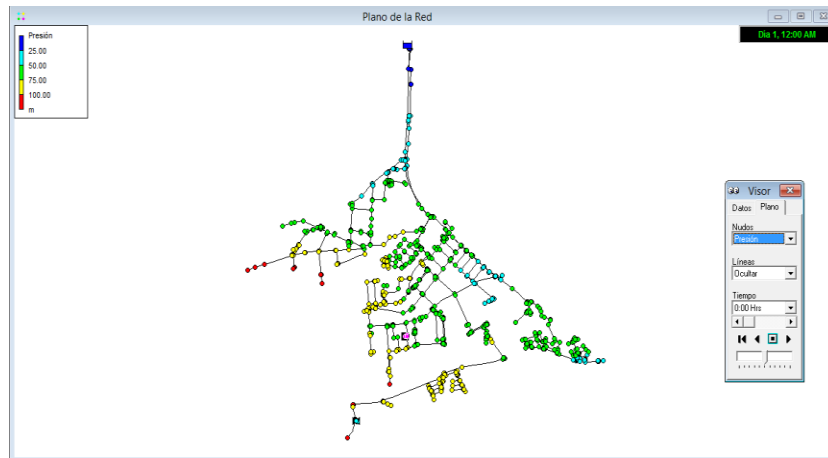
Se obtienen modelos hidráulicos sin calibrar y con el procedimiento de calibración respectivo. Los distritos escogidos para el estudio de influencia de la calibración en el procedimiento de optimización fueron los siguientes: **Cañaverál, Morro alto y Centro.**

Los fueron suministrados por el **amb**, el cual en conjunto con la Universidad Industrial de Santander ha realizado la modelación y respectiva calibración de estos.

El sector escogido para realizar el estudio es para el distrito llamado Cañaverál. Ubicado en la ciudad de Bucaramanga, Santander.

El modelo inicial de la red de distribución de agua potable del distrito Cañaverall fue suministrado por el **amb**, el cual posee en su base de datos la topología, topografía, catastro, demandas y consumos, así como todas las variables hidráulicas que contiene la red de distribución.

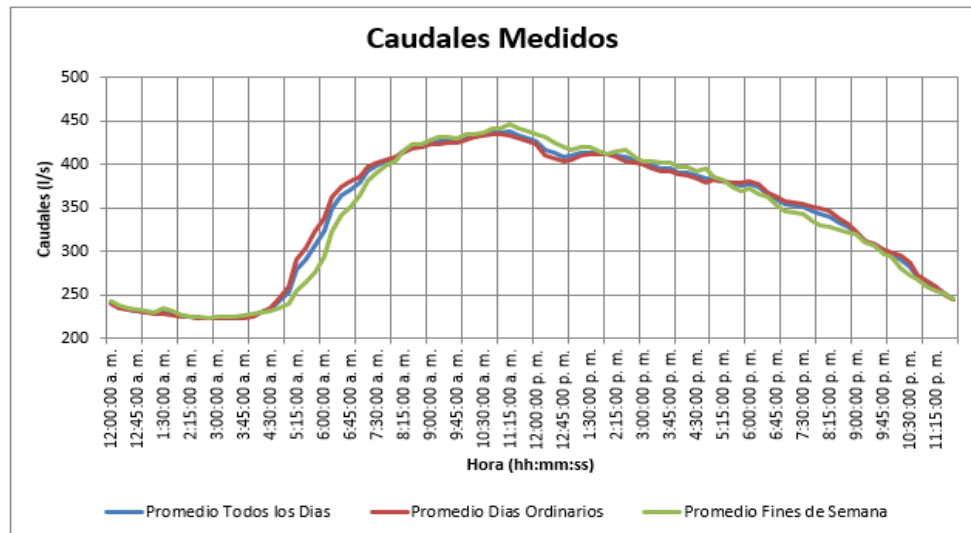
**Figura 2. Modelación EPANET amb para distrito Cañaverall.**



### 2.3 MEDICIÓN PRELIMINAR DE CAUDALES Y PRESIONES

Es necesario recaudar la mayor información posible de macromedidores para caudales y presiones en condiciones reales, ya que estas series medidas representan el verdadero comportamiento de la red.

**Figura 3. Obtención de la serie de caudales medida para el distrito Cañaverl amb**

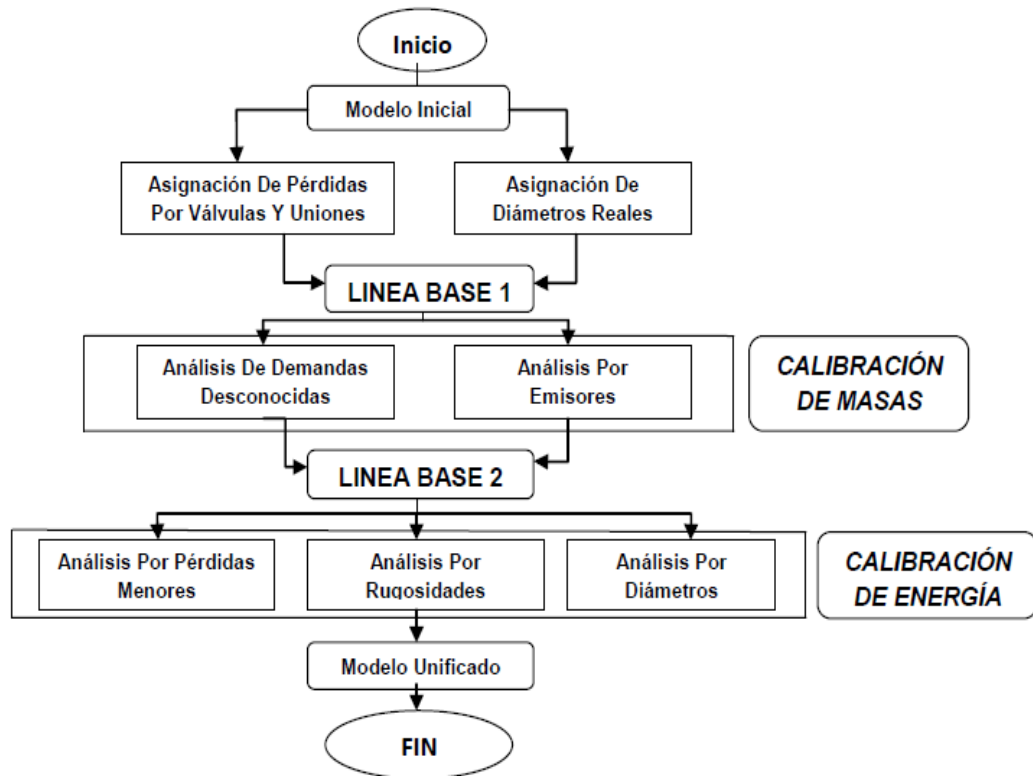


## 2.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO PRELIMINAR

En el proceso de calibración del modelo preliminar es necesario estimar diferentes escenarios con el fin de generar al modelo ajustes en sus propiedades hidráulicas.

A continuación se visualiza el esquema que se debe proceder al realizar la calibración de una red de agua potable.

**Figura 4. Metodología de calibración de redes de distribución de agua potable**



Fuente: JURADO, Cesar Mauricio. Metodología de calibración de redes de distribución de agua potable. Universidad De Los Andes. Bogotá, Colombia.

## 2.5 EVALUACIÓN DE MODELOS POR ESCENARIOS

La evaluación de modelos por escenarios consiste en realizar el ajuste de los parámetros de la calibración en el modelo ideal: *Ajuste por demandas desconocidas, ajuste por emisores, ajuste por diámetros, ajuste por pérdidas menores y ajuste por rugosidad.*

Es necesario comparar y escoger el mejor ajuste de manera simultánea tanto para la curva de caudales como para la curva de presiones.

El éxito de la calibración se enfatiza en la escogencia de los escenarios que mejor se ajusten al modelo ideal sin generar variaciones significativas que afecten el caudal de consumo y presiones de la red.

En la metodología para la calibración, la escogencia de los determinados escenarios y sus respectivos factores de ajuste están en base de pruebas de ensayo y error, según las propiedades de las tuberías que componen la red; Su edad, su diámetro y tipo de material presentaran factores multiplicadores dados.

## **2.6 MODELO DEFINIDO**

La unificación de escenarios luego de su respectivo análisis y ajuste proporciona un modelo debidamente calibrado.

De este modo se cumple con uno de los objetivos en pretender realizar un estudio de mejora de la confiabilidad con una red con características ajustadas a la realidad. Este modelo será empleado para comparar resultados obtenidos por la metodología para la optimización entre redes no calibradas y calibradas respectivamente.

## **2.7 OPTIMIZACIÓN DEL ÍNDICE DE RESILIENCIA**

Mediante el modelo desarrollado en Visual Basic, se propone maximizar la función objetivo en base a la reposición de tuberías de la red.

La interfaz del modelo plantea una serie de parámetros de entrada los cuales hacen parte dentro del procesamiento interno que se genera por el algoritmo.

**Figura 5. INTERFAZ modelo desarrollado en Visual Basic por Sergio Torres. Universidad Industrial de Santander 2011. Bucaramanga. Colombia.**

Datos de Entrada

*Variables Hidráulicas*

Diámetro Máximo mm 500

Rugosidad mm si usa D-W 150

Presión Mínima mca 15

*Variables del costo*

Kcosto \$ m mm 1052.811

nCosto 1.0138

$C_j = K_{costo} L_j (D_j)^{n_{costo}}$   
Costo de renovación. Ecuación aproximada

Costo del Agua [\$/m3] 360

*Emisores para estimar fugas*

Asignar parámetros  $Q_f = C P^a$

C  a

Dejar parámetros por defecto

C= 0.001 LPS/(mca<sup>1.15</sup>)

a= 1.15

*Variables del Método*

Importancia para In 95 [%]

Parámetro P (máx 350) 350

Número de Cambios (Red con 114 tubos) 30

Calcular

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para determinar la importancia de la calibración en el proceso de optimización de redes de distribución se plantea realizar la diferenciación entre los resultados obtenidos por optimización para los diferentes modelos hidráulicos anteriormente mencionados.

Adicionalmente se plantea la hipótesis entre la comparación para un modelo original respecto a un modelo nuevo sin calibrar estimando las pérdidas técnicas. El modelo ejemplo empleado para su demostración de análisis y resultados es el distrito Cañaverál. **El número de cambios sugerido es de 150 tuberías.**

#### 3.1 ANÁLISIS DE IMPORTANCIA

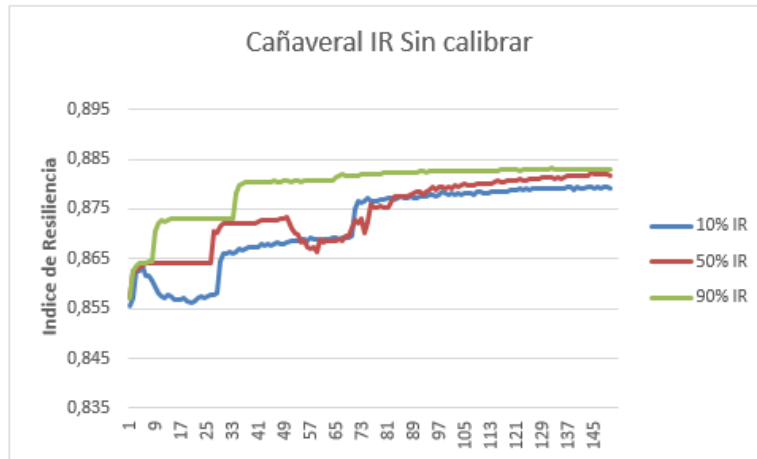
- ***Red no calibrada:***

La red compuesta por el distrito Cañaverál, que se encuentra sin calibrar. Se someterá al proceso de optimización mediante la metodología anteriormente seleccionada. El modelo hidráulico es proporcionado por **amb**.

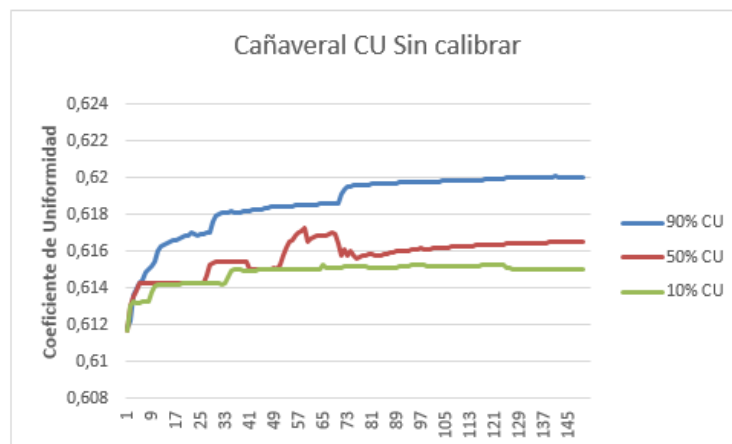
Para obtener una mayor verificación de resultados, se procede a darles diferentes valores de importancia de peso tanto para el Índice de resiliencia, en su medida el Coeficiente de uniformidad recibe el complemento restante de importancia. Es decir, para el análisis del 5%; Ir recibe 10% de importancia dentro de la función objetivo, mientras que la medida de importancia para el Cu será consecuentemente del 90%. De tal modo, estos valores asignados fueron respectivamente: 10%, 50%, y 90%.

En efecto, la comparación de importancias en función del Ir y el Cu para un modelo sin calibrar es la siguiente:

**Figura 6. Comparación de importancia del IR según su importancia vs número de cambios en un modelo no calibrado**



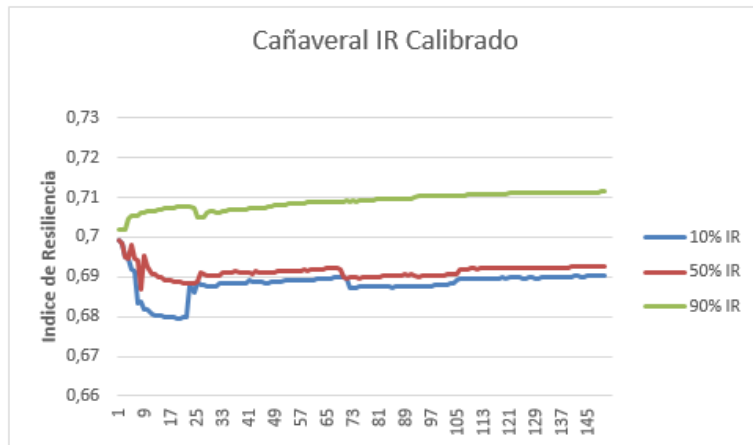
**Figura 7. Comparación de importancia del CU según su importancia vs número de cambios en un modelo no calibrado**



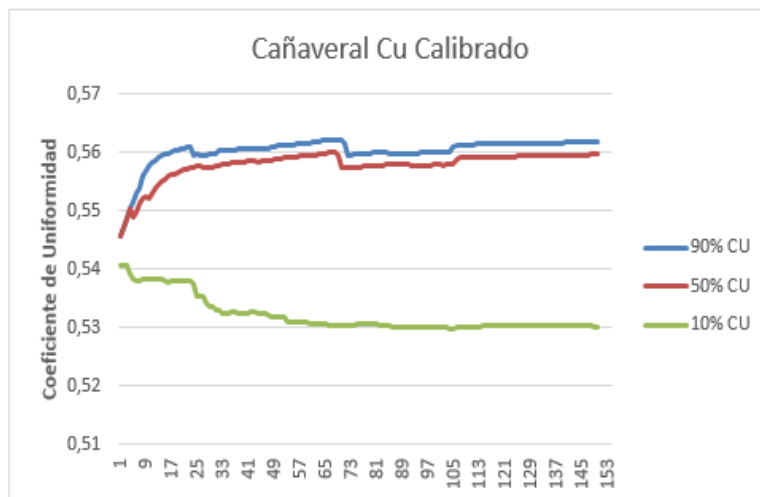
- **Red calibrada:**

Del mismo modo se obtienen resultados para el modelo calibrado:

**Figura 8. Comparación de importancia del IR según su importancia vs número de cambios en un modelo calibrado**



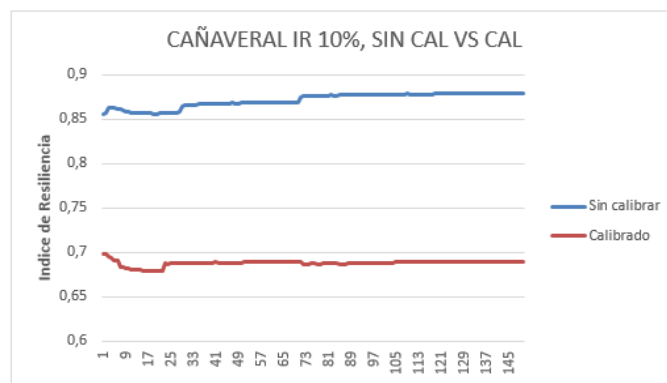
**Figura 9. Comparación de importancia del CU según su importancia vs número de cambios en un modelo calibrado**



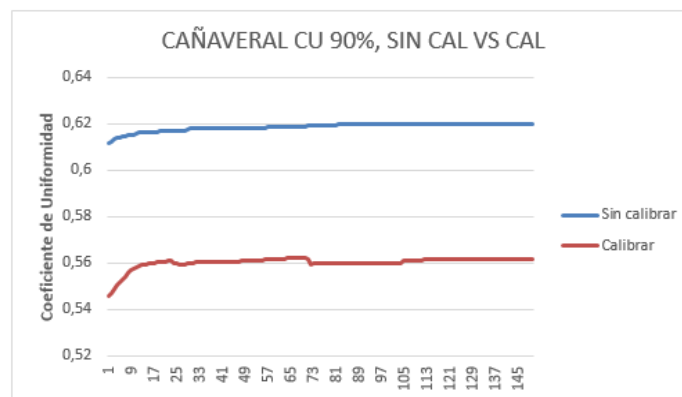
### 3.2 COMPARACIÓN ENTRE MODELOS

Es necesario realizar un análisis de comparación entre los modelos no calibrados y calibrados. A continuación se ilustrará la incidencia de la calibración en el proceso de la optimización de redes según la importancia dada a las medidas sustitutivas y en función del número de cambios.

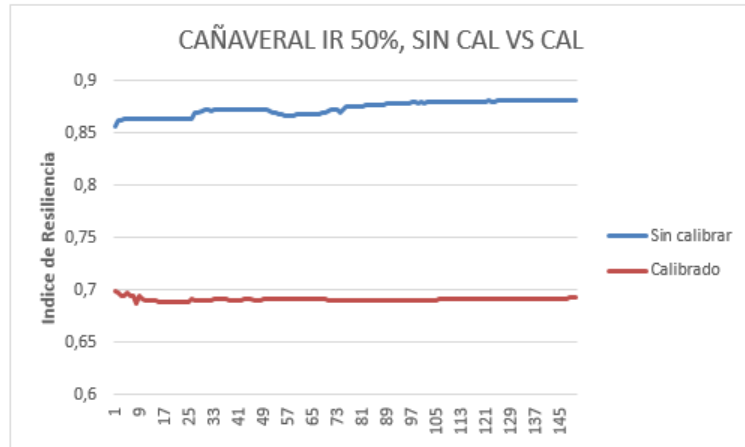
**Figura 10. Comparación entre el IR del modelo calibrado y no calibrado para un 10% de importancia para el IR**



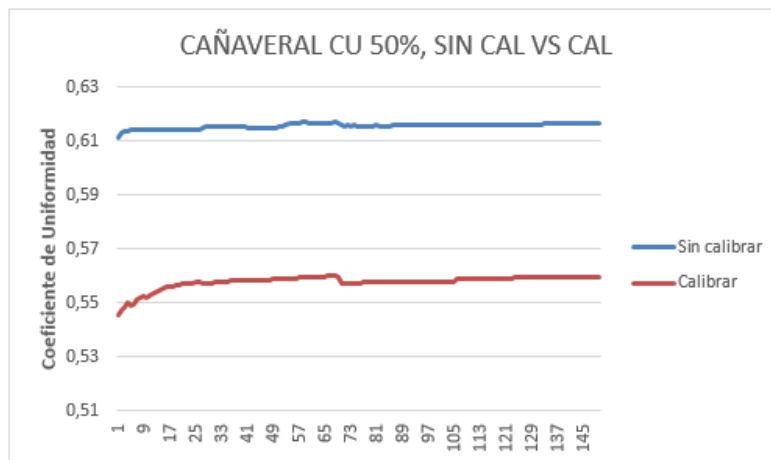
**Figura 11. Comparación entre el CU del modelo calibrado y no calibrado para un 90% de importancia para el IR**



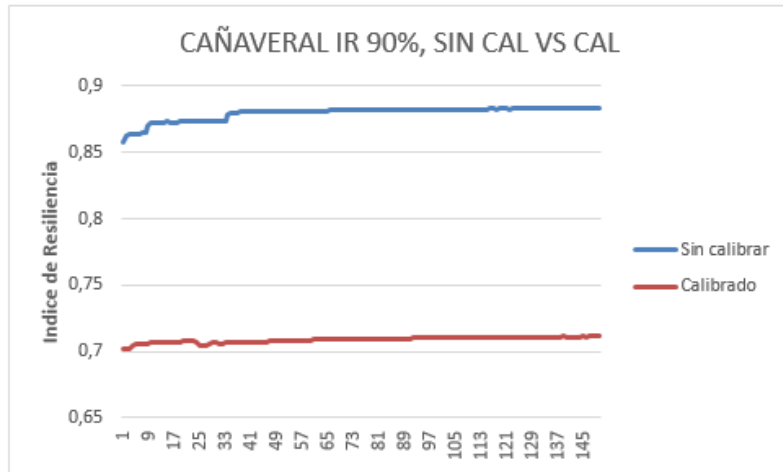
**Figura 12. Comparación entre el IR del modelo calibrado y no calibrado para un 50% de importancia para el IR**



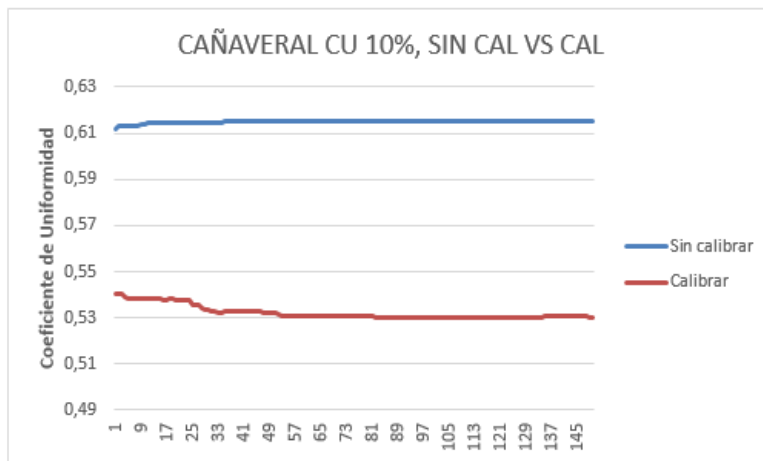
**Figura 13. Comparación entre el CU del modelo calibrado y no calibrado para un 50% de importancia para el IR**



**Figura 14. Comparación entre el IR del modelo calibrado y no calibrado para un 90% de importancia para el IR**



**Figura 15. Comparación entre el CU del modelo calibrado y no calibrado para un 90% de importancia para el IR**



Las siguientes tablas comparan los resultados para el Índice de resiliencia, el coeficiente de uniformidad, rango de presiones y presiones promedio para los diferentes distritos evaluados. Los factores de importancia analizados fueron del 50% para el Ir y 50% para el Cu respectivamente.

Parámetros a estudiar: Valores mínimos y máximos.

**Tabla 1. Comparación de resultados mínimos y máximos por modelo analizado Parámetros a estudiar: Valores iniciales y finales**

Parametro	Modelo Hidraulico					
	Cañaveral		Centro		Morro Alto	
	Sin calibra	Calibrado	Sin calibr	Calibrado	Sin calibr	Calibrado
Min IR	0,86	0,69	0,93	0,80	0,97	0,83
Max IR	0,90	0,72	0,94	0,99	0,98	0,89
$\Delta$ IR	0,04	0,03	0,01	0,19	0,01	0,06
Min CU	0,61	0,54	0,46	0,63	0,46	0,50
Max CU	0,67	0,56	0,48	0,99	0,46	0,54
$\Delta$ CU	0,06	0,02	0,02	0,36	0,01	0,04
Min Rang	71,24	78,11	91,40	89,78	163,99	138,04
Max Rang	71,36	78,36	92,39	90,10	167,42	149,01
$\Delta$ rang	0,11	0,26	0,99	0,32	3,43	10,97
Min PP	54,19	64,80	49,00	45,88	82,30	78,55
Max PP	68,26	68,92	52,77	47,99	84,20	82,18
$\Delta$ PP	14,07	4,12	3,77	2,11	1,90	3,63

**Tabla 2. Comparación de resultados iniciales y finales por modelo analizado**

Parametro	Modelo Hidraulico					
	Cañaveral		Centro		Morro Alto	
	Sin calibra	Calibrado	Sin calibr	Calibrado	Sin calibr	Calibrado
IR Inicial	0,86	0,70	0,932	0,80	0,98	0,83
IR Final	0,88	0,69	0,934	0,99	0,98	0,89
$\Delta$ IR	0,02	-0,01	0,002	0,19	0,01	0,05
CU Inicial	0,612	0,55	0,458	0,63	0,462	0,53
Cu Final	0,617	0,56	0,462	0,99	0,462	0,51
$\Delta$ CU	0,005	0,01	0,00	0,36	0,000	-0,02
Rang Inicial	71,26	78,29	92,30	89,96	166,08	139,94
Rang Final	71,36	78,17	91,41	89,69	167,42	147,58
$\Delta$ rang	0,10	-0,12	-0,89	-0,27	1,34	7,65
PP Inicial	54,19	65,50	49,11	46,68	83,63	79,82
PP Final	54,21	64,85	49,12	45,99	84,20	82,14
$\Delta$ PP	0,02	-0,65	0,02	-0,69	0,57	2,32

### 3.3 MODELO SIN CALIBRAR ESTIMANDO PÉRDIDAS TÉCNICAS

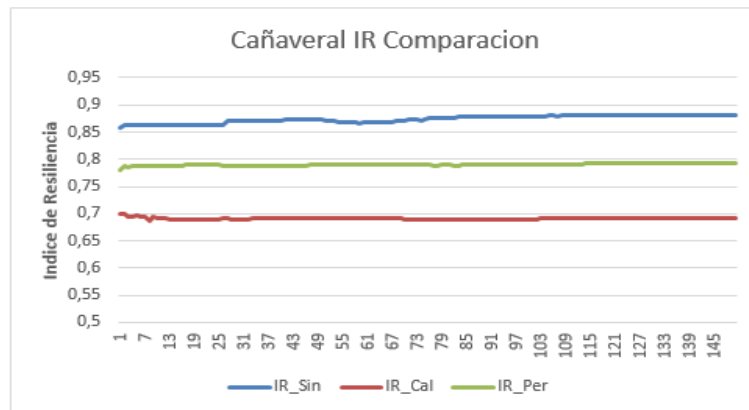
Dentro de una red de distribución de agua potable las pérdidas técnicas componen la cantidad de agua que se pierde debido a daños de esta. El efecto de aparición de fugas en el sistema está directamente relacionado al tipo y material empleado, la incidencia de presiones críticas en puntos de la red, características del suelo, etc.

Por tal razón, se pretende conocer que tanta incidencia presenta este tipo de perdidas como factor del proceso de calibración.

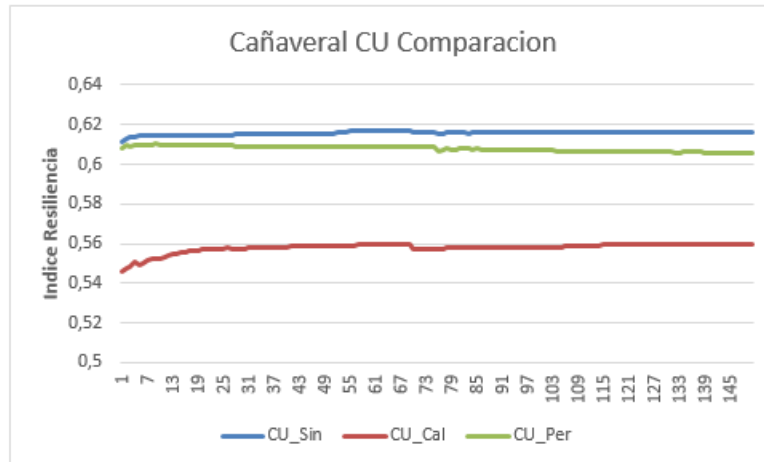
Como valor estimativo se procede a reducir la demanda base del modelo hidráulico Cañaveral en un 22%.

Para el análisis gráficamente se establece como comparación los modelos sin calibrar, el modelo calibrado y el modelo original con sus pérdidas técnicas estimadas. Este análisis se realizó para el 50% de importancia del Ir y el 50% para el Cu respectivamente.

**Figura 16. Comparación para el IR según la condición del modelo analizado**



**Figura 17. Comparación para el CU según la condición del modelo analizado**



**Tabla 3. Comparación de resultados iniciales y finales para el modelo Cañaverall según su condición de análisis**

<b>Modelo hidraulico Cañaverall</b>			
<b>Parametro</b>	<b>Sin calibrar</b>	<b>Calibrado</b>	<b>Perdidas</b>
Ir Inicial	0,86	0,70	0,78
Ir Final	0,88	0,69	0,79
$\Delta ir$	0,02	-0,01	0,01
Cu Inicial	0,61	0,55	0,61
Cu Final	0,62	0,56	0,61
$\Delta cu$	0,00	0,01	0,00
Rang Inicial	71,26	78,29	70,91
Rang Final	71,36	78,17	70,99
$\Delta rang$	0,10	-0,12	0,08
PP Inicial	54,19	65,50	54,95
PP Final	54,21	64,85	54,14
$\Delta PP$	0,02	-0,65	-0,81

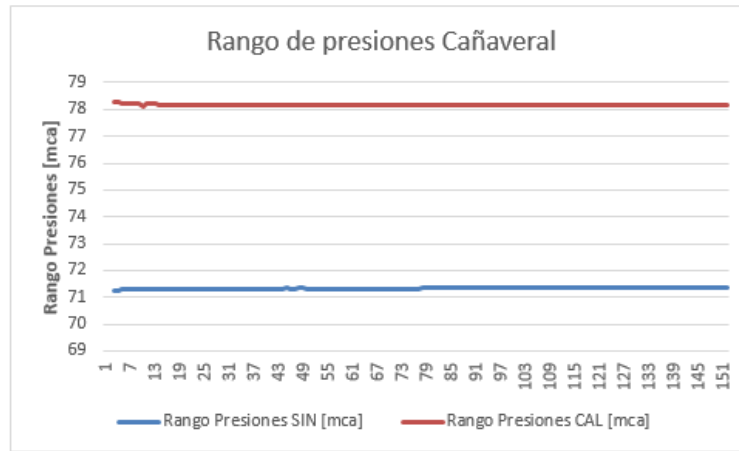
### 3.4 ANÁLISIS DE IMPORTANCIA PARA EL RANGO DE PRESIONES

La incidencia de las presiones es un factor de gran importancia en las redes de distribución, dependiendo del comportamiento de estas, se determina la aparición de posibles estallidos de tuberías y fugas dentro de la red.

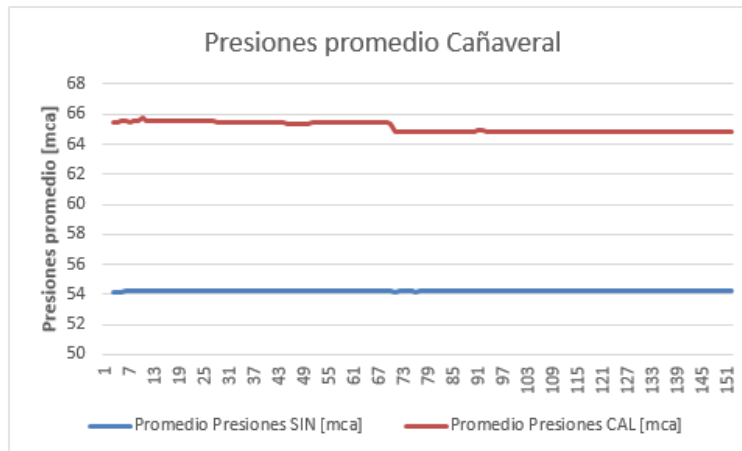
Se establece que el rango de presiones presentes en una hora de consumo determinada, demuestra la incidencia de la calibración en redes de distribución; para esto, el análisis propone verificar la incidencia en el proceso de optimización para los rangos de presiones en modelos hidráulicos antes y después de haberlos sido sometidos al proceso de calibración.

De este modo, el modelo hidráulico proporcionado por el **amb**, llamado Cañaveral es procesado por optimización de redes con un factor de importancia de 50% para el  $I_r$  y 50% para el coeficiente de uniformidad respectivamente. Al mismo tiempo, se cuenta el análisis para el modelo sin calibrar y calibrado. A continuación se ilustra gráficamente el análisis realizado para el rango de presiones.

**Figura 18. Rango de presiones del distrito Cañaverál a lo largo del número de cambios para el proceso de optimización**



**Tabla 19. Presiones promedio del distrito Cañaverál a lo largo del número de cambios para el proceso de optimización.**



El rango de oscilación para el rango de presiones y presión promedio para el distrito Cañaverál fueron los siguientes:

**Tabla 4. Comparación de resultados de presiones para el distrito Cañaverál sin calibrar y calibrado.**

Distrito Cañaverál		
Parametro	Sin calibrar	Calibrar
Rang Inicial	71,26	78,29
Rang Final	71,36	78,17
<b><math>\Delta</math>rang</b>	<b>0,10</b>	<b>-0,12</b>
PP Inicial	54,19	65,50
PP Final	54,21	64,85
<b><math>\Delta</math>PP</b>	<b>0,02</b>	<b>-0,65</b>

### 3.5 ANÁLISIS POR CAMBIOS EMPLEADOS

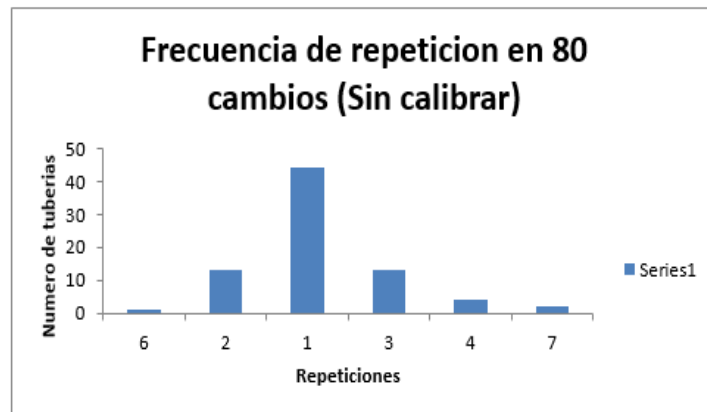
En el proceso de optimización, donde se planteen cambios de tuberías a un diámetro mayor comercial, es posible que se establezcan cambios nuevos sobre una tubería antes cambiada. Esto se da en proporción para maximizar la función objetivo de las redes de distribución.

Es necesario realizar un análisis que determine cuál es el número de cambios definitivos a realizar en la red analizada, de tal modo que se prioricen los cambios finales en campo.

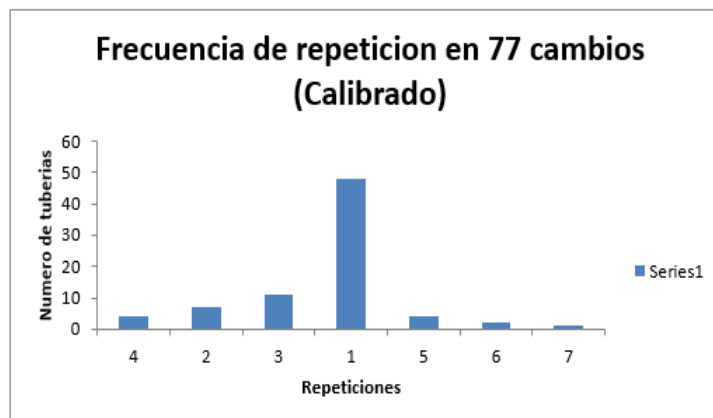
En función de prevención y mantenimiento, este análisis se basa en disminución de costos. De tal modo que se genere menores inversiones a la hora de emplear materiales y esfuerzos en mano de obra.

Los resultados, fueron analizados para el distrito Cañaverall. Los factores de importancia dados para la optimización de redes fueron 50% para el Índice de resiliencia y 50% para el coeficiente de uniformidad respectivamente. Adicionalmente, se plantea para la red no calibrada y calibrada.

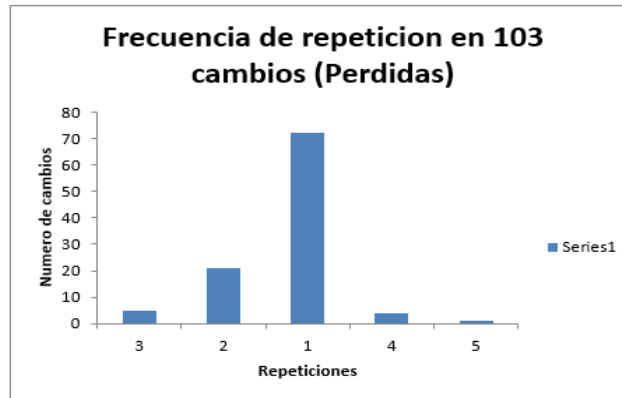
**Figura 20. Numero de cambios propuestos para tuberías. Modelo sin calibrar**



**Figura 21. Numero de cambios propuestos para tuberías. Modelo calibrado**



**Figura 22. Numero de cambios propuestos para tuberías. Modelo sin calibrar estimando pérdidas del 22%**



La siguiente tabla representa el número de cambios propuestos para los diferentes modelos analizados.

**Tabla 5. Comparación para los números de cambios empleados según el modelo hidráulico analizado**

Parametro	Modelo hidraulico						
	Cañaveral			Centro		Morro Alto	
	Sin calibrar	Calibrado	Perdidas	Sin calibra	Calibrado	Sin calibra	Calibrado
Numero de cambios	80	77	103	83	75	111	108
$\Delta$ Cambios	3			8		3	

#### 4. CONCLUSIONES

- En el proceso de optimización de redes tomando valores de importancia del 50% para ambas medidas sustitutivas en el modelo Cañaveral sin calibrar se presentó un aumento en el índice resiliencia de 0.85 a 0.88. Para el modelo calibrado presentó disminución de 0.697 a 0.692. Por otro lado se presentó para el coeficiente de uniformidad aumento; en el modelo sin calibrar aumento de 0.61 a 0.616, mientras que en modelo calibrado aumento de 0.54 a 0.56 respectivamente.
- En el proceso de optimización de redes tomando valores de importancia del 50% para ambas medidas sustitutivas en el modelo Morro Alto sin calibrar se presentó un aumento en el índice resiliencia de 0.977 a 0.983. Para el modelo calibrado presentó el aumento de 0.834 a 0.888. Por otro lado se presentó disminución para el coeficiente de uniformidad; en el modelo sin calibrar de 0.462 a 0.461 y en el modelo calibrado de 0.533 a 0.515 respectivamente.
- En el proceso de optimización de redes tomando valores de importancia del 50% para ambas medidas sustitutivas en el modelo Centro sin calibrar se presentó un aumento en el índice resiliencia de 0.932 a 0.933. Para el modelo calibrado presentó el aumento de 0.80 a 0.98. Por otro lado se presentó disminución para el coeficiente de uniformidad en el modelo sin calibrar de 0.47 a 0.46. Para el modelo calibrado presentó un aumento de 0.62 a 0.98.
- Los resultados obtenidos por el modelo de Cañaveral sin calibrar y cuyas pérdidas fueron estimadas en un 22% fueron los siguientes: El índice de resiliencia aumentó de 0.77 a 0.79, el coeficiente de uniformidad disminuyó de 0.608 a 0.605, el rango de presiones aumento de 70.91 a 70.98 mientras que

las presiones promedio se redujo de 54.95 a 54.14. Es decir, se evidencia que dentro del proceso de calibración se considera de manera significativa este tipo de pérdidas siendo uno de los factores de mayor incidencia en el proceso de calibración.

- En el análisis de importancia, en el cual se tiene en cuenta valores de peso dados del 10%, 50% y 90%; Se evidencia que entre mayor sea la importancia dada a alguna medida sustitutiva, mayor será la influencia de esta medida en la obtención de resultados. Por esta razón es necesario determinar un rango estimado de porcentajes para realizar diferentes análisis de importancia según sea se desee optimizar.
- No se puede establecer un criterio universal acerca de la influencia de la calibración en el proceso de optimización debido al complejo número de variables propias de cada red tales como: Topografía de la red, condiciones reales de variables hidráulicas y topológicas de la red. Es necesario realizar análisis independientes teniendo en cuenta dichas condiciones de cada red de distribución.

## BIBLIOGRAFÍA

ARAQUE FUENTES, Diego A. SALDARRIAGA, Juan G. Optimización operacional de redes de distribución de agua potable con el fin de maximizar la uniformidad de presiones en los nodos de consumo. 2005 [Posgrado]. Bogotá, Colombia: Centro de investigaciones en acueductos y alcantarillados –CIACUA, Universidad de los Andes, Colombia.

ARDILA PATIÑO, Fénix E. y, BOHÓRQUEZ ARRIETA, Yuranis. Propuesta metodológica para la calibración de redes de distribución del distrito Malpaso-Cañaveral del acueducto metropolitano de Bucaramanga y estimación del índice de agua no contabilizada. 2011 [Pregrado]. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.

LONDOÑO G., Elizabeth, BUSTAMANTE B., Nicolás, BARBOSA M., Samir; Metodología para la rehabilitación de tuberías en redes de distribución de agua potable en el distrito de morro y centro, mediante la uniformización del plano de presiones con base en el índice de resiliencia y empleando curvas de supervivencia. 2012. [Pregrado]. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.

Metodología Calibración Redes Distribución Agua Potable. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/48829940/10-Metodologia-Calibracion-Redes-Distribucion-Agua-Potable> [Citado el 10 de octubre de 2014].

Metodología Para Definición de Plano Óptimo de Presiones. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/48891444/17-Metodologia-Para-Definicion-de-Plano-Optimo-de-Presiones> [Citado el 10 de octubre de 2014].

SALDARRIAGA, J. G. y SALAS, D. E. "Calibración de redes de distribución de agua potable bajo un ambiente de fugas", Seminario Internacional La Microinformática en la gestión integrada de los recursos hídricos, Universidad de los Andes, Bogotá Dc., Colombia

TODINI, Ezio. Looped wáter distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. Urban wáter. Vol., Issue 2 (Junio, 200).

TORRES MARTÍNEZ, Sergio A. Optimización del índice de resiliencia y uniformización de la presión como criterios para renovar tuberías en redes de distribución de acueductos. 2011 [Pregrado]. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.