

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y
Ambiental

Centro de Investigaciones en Acueductos y
Alcantarillados
CIACUA



Universidad
de los Andes

PAVCO S.A.
Una empresa AMANCO



CÁTEDRA PAVCO

**Optimización de Redes de Acueducto con el fin de
Uniformizar el Estado de Presiones**

**Tesis desarrollada por: Diego Alejandro Araque Fuentes
(Pregrado en Ingeniería Civil)**

Bogotá, Junio de 2004

TABLA DE CONTENIDO

1	PRESENTACIÓN DEL PROYECTO	1
1.1	Introducción.	1
1.2	Objetivos.	2
1.2.1	Objetivos Generales.	2
1.2.2	Objetivos Específicos.	2
2	MARCO TEÓRICO	3
2.1	Pérdidas en redes de distribución	3
2.1.1	Pérdidas de presión por fricción en tuberías.	3
2.1.2	Efecto de la presencia de fugas.	5
2.2	Programa de Rehabilitación de Redes de Acueducto	7
2.2.1	Estructura del Programa de Rehabilitación de Redes de Acueducto.	7
2.3	Indicadores de Comportamiento para la Optimización de Redes de Acueducto con el fin de Uniformizar el Estado de Presiones.	9
2.3.1	Índice de Resiliencia.	11
2.3.2	Uniformidad de Presiones.	12
2.3.3	Desviación Estándar.	12
2.3.4	Tiempo de retención de agua en la red.	13
2.3.5	Volumen en la red.	13
2.3.6	Perjuicio hidráulico.	14
2.4	Herramientas Técnicas utilizadas para la Optimización de Redes de Acueducto con el fin de Uniformizar el Estado de Presiones.	14
2.4.1	Análisis de Redes Cerradas.	15
2.4.2	Método del Gradiente.	16
2.4.3	Modelo de Rehabilitación y Mantenimiento.	19
2.4.3.1	UtilNets (Unión Europea).	19
2.5	Soporte de Decisión para la Optimización de Redes de Acueducto con el fin de Uniformizar el Estado de Presiones.	22
2.5.1	Algoritmos Determinísticos.	23
2.5.1.1	Algoritmo greedy.	23
2.6	Descripción del Algoritmo determinístico	23
2.6.1	Objetivo del Algoritmo Determinístico.	23
2.6.2	Estructura del Algoritmo.	24
2.6.3	Funciones utilizadas dentro del algoritmo determinístico.	26
2.6.3.1	Función de selección no objetiva.	26
2.6.3.2	Función de factibilidad.	26
2.6.3.3	Función de selección objetiva.	26
2.7	Bibliografía.	28
3	PRUEBAS Y RESULTADOS	29
3.1	Desarrollo del Algoritmo.	29
3.2	Aplicación a la Red existente.	42
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	50
4.1	Influencia de las variables sobre el desarrollo del algoritmo.	50
5	CONCLUSIONES	51
6	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	52

1 PRESENTACIÓN DEL PROYECTO

1.1 Introducción.

Una red de distribución de agua puede describirse como el conjunto de tuberías, válvulas, y bombas, cuyo objetivo primordial es el de suministrar o distribuir el agua a los usuarios finales (los nodos) bajo las condiciones de servicio requeridas por los mismos. Sin embargo las tuberías conforman el porcentaje de costo más importante del sistema.

Es bien entendido que las infraestructuras de suministro de agua a lo largo del mundo son sistemas deteriorados, sobre-diseñados, debido a las metodologías de diseño utilizadas anteriormente. Este problema paralelo a la expansión extensa de las ciudades produce efectos directos sobre la tensión financiera en los niveles presentes. Las empresas encargadas de la distribución de agua están enfrentando por consiguiente el problema de manejar redes deterioradas de la manera más eficaz posible para mantener los niveles presentes y futuros de servicio.

Los niveles de servicio son normalmente basados en criterios predeterminados los cuales generalmente son presentados por el proveedor de agua en forma de norma o resolución. Para el caso Colombiano, el Reglamento Técnico del sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) es la norma a seguir.

Adicionalmente, existen obligaciones que el proveedor debe cumplir. Los objetivos principales normalmente incluyen, como un mínimo, la entrega de agua a una presión mínima y caudal de entrega al mismo tiempo de normas de calidad de agua. Debido a la naturaleza y planeamiento de las redes de distribución de agua potable, la presión mínima de entrega en los nodos de consumo es el criterio violado en la mayoría de los casos. En primer lugar el concepto de presión está directamente relacionado a la redundancia incorporada y almacenamiento de la Red. Por lo tanto el no cumplimiento de éste criterio incrementa las fugas no detectadas en la red de acueducto, lo cual genera sobre-costos para las empresas proveedoras del servicio.

Es obvio que para un sistema de suministro de agua deteriorando se deben realizar las acciones de mantenimiento necesarias para encontrar los niveles de servicio determinados por la norma. El mantenimiento se lleva a cabo para prevenir las fallas del sistema, así como para restaurar la capacidad del sistema cuando una falla ocurra. El objetivo primordial del mantenimiento es mantener o mejorar la confiabilidad del sistema así como la regularidad del funcionamiento [1].

El mantenimiento consiste típicamente en la rehabilitación, reparación y renovación de las tuberías que no permiten la eficaz entrega de los niveles de servicio. La mayoría de las políticas de mantenimiento combinan el desarrollo de una técnica de soporte de decisión a partir del reemplazo de líneas de tubería basada en el juicio técnico bajo el buen conocimiento hidráulico del sistema.

Con el fin de reforzar las decisiones de mantenimiento es por consiguiente esencial mejorar el entendimiento del proceso de deterioración y la evolución de fallas en las tuberías de redes de agua y desarrollar los modelos de predicción apropiados que pueden ayudar en el proceso de decisión.

El modelo resultante puede servir como una herramienta de diagnóstico o una herramienta de optimización, pero también, cuando es acoplado un modelo económico, estos se vuelven en la herramienta poderosa para la decisión de las empresas proveedoras del servicio [2].

Para mejorar la confiabilidad del sistema, el problema se formula de la siguiente manera:

$$\text{Maximizar } f(i) = 1 - \text{Beneficio}(i) = \text{Perjuicio}(i);$$

donde Beneficio (i) es el beneficio obtenido al implementar la configuración de tuberías i y f (i) es una función que depende de la configuración del sistema de distribución de agua potable i. Al final, mediante alguna metodología se busca el punto óptimo de rehabilitación, el cual corresponde al momento a partir del cual al maximizar f (i) no se logra aumentar el beneficio de manera significativa.

El beneficio es una medida del mejoramiento del nivel de servicio experimentado por los consumidores, el cual es explicado por un Índice de Resiliencia, el cual relaciona la Energía disipada por el sistema bajo la configuración física real con la Energía que debe disipar el sistema.

1.2 Objetivos.

1.2.1 Objetivos Generales.

El objetivo principal del proyecto es el de establecer un marco de referencia para la Rehabilitación de Redes de Acueducto con el fin de uniformizar el estado de Presiones de Servicio.

El resultado final es un Sistema de Soporte de Decisión, el cual apoyará a los usuarios finales, entendidos como las entidades encargadas del control y la distribución de agua, para establecer el mantenimiento efectivo de las Redes de Acueducto.

1.2.2 Objetivos Específicos.

Mediante modelaciones, desarrollar el algoritmo que permita encontrar las líneas de tubería en las que se debe priorizar la rehabilitación con el fin de uniformizar el estado de Presión de Servicio en cada uno de los sectores de la Red de distribución de Agua Potable.

A partir de la técnica desarrollada, encontrar el punto óptimo de rehabilitación, el cual relaciona el nivel de Uniformidad con el Costo respectivo. Esto es de vital importancia, desde el punto de vista presupuestal, para las empresas distribuidoras de agua potable.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Pérdidas en redes de distribución

2.1.1 Pérdidas de presión por fricción en tuberías.

La energía de entrada al sistema de distribución de agua potable es el caudal y la presión correspondiente al nodo de entrada a la red, además la energía hidráulica aportada por la bomba, en caso de presentarse. Sin embargo esta energía puede perderse por razón del movimiento del fluido, ya que la energía cinética debe permanecer constante si el área es constante, y la energía potencial solo depende de la posición [4]. La energía de presión expresada como energía por unidad de peso del fluido tiene dimensiones de cabeza (h), y esta expresada en la ecuación de Darcy-Weisbach, Ecuación 2.1:

$$h_f = f \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

donde,

- h_f = energía por unidad de peso perdida por fricción.
- f = factor de fricción de Darcy.
- l = longitud del tramo de la tubería en el cual se pierde h_f .
- d = diámetro de la tubería.
- v = velocidad media.

en donde el factor de fricción es una función compleja del número de Reynolds y de la rugosidad relativa:

$$f = f\left(\text{Re}, \frac{k_s}{d}\right)$$

y el número de Reynolds, Re , está definido como la relación existente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas, Ecuación 2.2:

$$\text{Re} = \frac{vd\rho}{\mu} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

donde ρ y μ son características físicas del fluido y corresponden a la densidad y la viscosidad respectivamente.

El factor de fricción de Darcy está relacionado directamente con el esfuerzo cortante ya que este último es el responsable de las pérdidas de energía por fricción; por lo tanto si se analiza la pérdida de energía en un diferencial de longitud de tubería y luego se despeja el factor de fricción se tiene, Ecuación 2.3:

$$f = \frac{\partial h_f}{\partial l} \frac{2gd}{v^2} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Por otra parte se tiene una expresión para el esfuerzo cortante en la tubería a partir de la ecuación de viscosidad de Newton, Ecuación 2.4:

$$\tau_o = \frac{A}{P} \left(\frac{dp^*}{dl} \right) \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Siendo A y P, el área y el perímetro mojado de la tubería, dp^* el cambio de presión sobre el diferencial de longitud. De donde se obtiene,

$$\frac{dp^*}{dl} = \frac{P \tau_o}{A} = \frac{\tau_o}{R} = \rho g \frac{dh_f}{dl}$$

entonces:

$$\frac{dh_f}{dl} = \frac{\tau_o}{\rho g R}$$

Reemplazando este término en la Ecuación 2.3, se obtiene la Ecuación 2.5:

$$f = \frac{8\tau_o}{\rho v^2} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

En toda tubería recta que transporta un líquido a una temperatura determinada, existe una velocidad crítica (V_c) por debajo de la cual el régimen es laminar. Este valor crítico que marca la transición entre los dos regímenes, el laminar y el turbulento, corresponde a un $Re = 2300$, aunque en la práctica, entre 2000 y 4000 la situación es bastante imprecisa.

Por lo tanto:

- Re < 2000: Régimen laminar.
- 2000 < Re < 4000: Zona crítica o de transición.
- Re > 4000: Régimen turbulento.

Sin embargo es clara la necesidad de transportar el agua en redes de distribución bajo condiciones de régimen turbulento, debido a que a medida que la velocidad aumenta las pérdidas de energía por unidad de peso disminuyen; es decir, es más eficiente mover un fluido, con números de Reynolds altos que con números de Reynolds bajos en una tubería dada [4].

Para estas condiciones de flujo el factor de fricción fue definido por Colebrook y White, Ecuación 2.6:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad \text{Ecuación 2.6}$$

donde k_s es la rugosidad absoluta de la tubería.

La Ecuación 2.6 es válida para todo tipo de flujo turbulento en tuberías. Sin embargo, tiene el problema de que no es una ecuación explícita para el factor de fricción, lo cual implica la necesidad de utilizar algún método numérico luego de conocer todas las demás variables.

Como se ha visto el factor de fricción es un coeficiente de resistencia fluida, que involucra, de forma adimensional, las características físicas de la tubería (k_s , l y d) y el régimen de flujo presente (representado por el número de Reynolds). Es por eso que se debe afectar este factor de alguna manera, para al mismo tiempo afectar las pérdidas de energía.

Debido a que el régimen de flujo depende al mismo tiempo de las características físicas de la tubería, se tienen tres parámetros que pueden ser modificados para así afectar las pérdidas. Si en la Ecuación 2.3 se reemplaza la velocidad, se obtiene, Ecuación 2.7:

$$\frac{\partial h_f}{\partial l} = f \frac{8Q^2}{d^5 g \pi^2} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Por lo tanto al aumentar el diámetro de la tubería las pérdidas por unidad de longitud disminuyen, además se aumenta el área ocasionando la disminución de la velocidad. Esta es la principal razón por la cual el diámetro es el principal parámetro que debe tenerse en cuenta para modificar el estado de presiones en una red de distribución. La rugosidad absoluta individualmente no afecta el factor de fricción, y por lo tanto las pérdidas, mientras que la rugosidad relativa, es decir al dividir k_s por el diámetro, se altera el factor de resistencia fluida. Por otro lado no es posible modificar la longitud de la tubería, debido a que generalmente éstas son fijas, siguiendo las vías transporte de las ciudades.

2.1.2 Efecto de la presencia de fugas.

En todas las redes de distribución de agua existe un problema ocasionado principalmente por los altos niveles de presión. Debido a que la unión entre dos tuberías es una zona vulnerable desde el punto de vista mecánico del material de la tubería, es allí donde se presentan grandes esfuerzos ocasionados por la presión del agua. La presencia de fugas en estas zonas es una pérdida de energía hidráulica, debido a que se pierde energía para entregar el caudal de demanda en cada nodo bajo condiciones de presión de diseño. Además, desde el punto de vista económico, ese traduce en una cantidad de agua no contabilizada, generando pérdidas económicas para las empresas encargadas del suministro de este recurso.

El objetivo del mantenimiento de la red es conseguir que a todos los usuarios les llegue el suministro en la cantidad requerida y la presión adecuada. Para ello es necesario disponer de datos acerca de caudal de demanda y presiones de servicio con el fin de fijar los parámetros óptimos de consumo.

Un buen mantenimiento de red implica una correcta reducción de las fugas en la misma, la detección rápida y eficaz, su correcta reparación e incluso su prevención antes de que ocurran. Se estudian los datos durante 24 horas para conocer: El consumo nocturno (momento en el que la demanda real es mínima), el consumo de punta y el consumo medio. Periódicamente se realizan mediciones y se comparan los resultados con los datos obtenidos anteriormente. Una diferencia entre ellos implica un aumento de consumo y por tanto la existencia de fugas.

Los factores que afectan la presencia de fugas en la red de distribución son los siguientes [10]:

- La longitud de las líneas de distribución de agua potable.
- La longitud y el número de conexiones de servicio entre las líneas principales y el punto de medición. Las conexiones de servicio pueden ser consideradas como los puntos débiles de los sistemas de distribución, y es allí donde se presenta la pérdida de energía hidráulica así como el volumen no contabilizado perdido. Las fugas son generalmente bajas pero tienen una tasa de flujo de larga duración.
- Dentro de las condiciones del suelo, se pueden observar dos parámetros que afectan la presencia de fugas en el sistema de distribución de agua potable. El primero es la corrosión ocasionada a las tuberías debido al continuo movimiento del agua por entre los estratos del suelo, y segundo la detección de fugas, debido a que el proceso de monitoreo y ubicación se hace más difícil en suelos granulares.
- Debido al incremento del estado de presiones de servicio en el sistema de distribución generado por una elevada presión promedio de operación, la tasa de agua no contabilizada crece hasta un nivel en el que no es posible predecir teóricamente su relación con la presión.

La disminución de fugas presentes en la red se logra dentro de un proceso de optimización del estado de presiones sobre toda la red, el cual corresponde a la regulación de la misma. El objetivo principal es que en los nodos más alejados se mantenga una presión mínima a fin de garantizar un correcto servicio. Para conseguirlo, lo más sencillo es sobre-presionar el sistema para asegurar que en ningún momento la presión esté por debajo de una mínima necesaria. El problema que se origina es el aumento de fugas en las uniones con las pérdidas consiguientes.

Para reducir las fugas presentes, se debe disminuir el nivel de presión en las líneas de distribución. Esto genera el hecho que cada vez se coloquen más válvulas reductoras de presión en la entrada de zonas problemáticas. Para optimizar el estado de presiones debe ser necesario disponer de un sistema de regulación de presión adaptable en todo momento a las necesidades de la red, el cual es el principal objetivo del proyecto de optimización de redes de acueducto con el fin de uniformizar el estado de presiones.

2.2 Programa de Rehabilitación de Redes de Acueducto

Es claro que con el paso del tiempo la infraestructura de las redes de distribución de agua potable se va envejeciendo. Esto representa el principal desafío para las empresas proveedoras del servicio, el cual necesita de un efectivo manejo. Las ciudades sobre toda Europa gastan aproximadamente cinco billones de Euros al año en la rehabilitación de estos sistemas [3]; esto combinado con el alto nivel de pérdidas presentadas en las líneas de tubería existentes ocasiona la irregularidad del plano de presiones con respecto del óptimo, el cual debe entenderse como el plano más uniforme por encima del nivel de presión mínima de entrega.

Hasta ahora, los métodos de manejo efectivo han tenido un desarrollo relativamente pobre comparado con la meta técnica y financiera que el mejoramiento necesario de líneas de tubería realmente representa. Se han desarrollado muchas herramientas que permiten saber el grado de deterioro de las tuberías o el nivel al cual se debe realizar la rehabilitación correspondiente, sin embargo, éstas no tienen en cuenta los aspectos de decisión de rehabilitación específicamente, y han sido únicamente aplicadas a un número limitado de nivel de servicios. Por lo tanto se deben realizar las modelaciones respectivas de tal forma que se pueda validar estas herramientas sobre más niveles de servicio, o desarrollar una nueva técnica con el fin de encontrar los indicadores de comportamiento que sean el soporte del criterio de decisión de rehabilitación.

El objeto final del proyecto es el de desarrollar una técnica a partir de la cual se uniformice el nivel de presión de servicio de una red de acueducto mediante la formulación de la política de rehabilitación. Esta política se encuentra relacionada con el grado de pérdida de energía sobre la red, la cual disminuye al aumentar el diámetro de algunas tuberías [4].

2.2.1 Estructura del Programa de Rehabilitación de Redes de Acueducto.

El objetivo último es el de proveer un marco de referencia que sirva como un sistema de soporte de decisión para responder las incógnitas de donde y como rehabilitar las Redes de Acueducto. La estructura básica del programa es representada en la Figura 2-1.

El programa es organizado en 7 estaciones. Las estaciones 1 y 2 conforman el componente científico, 3 y 4 el componente metodológico y las 5, 6 y 7 el componente de decisión.

El marco de referencia del proyecto de optimización de redes de acueducto con el fin de uniformizar el estado de presiones, solo involucra las tres primeras estaciones, las cuales conforman el componente científico y parte del metodológico del Programa de Rehabilitación de Redes de Acueducto.

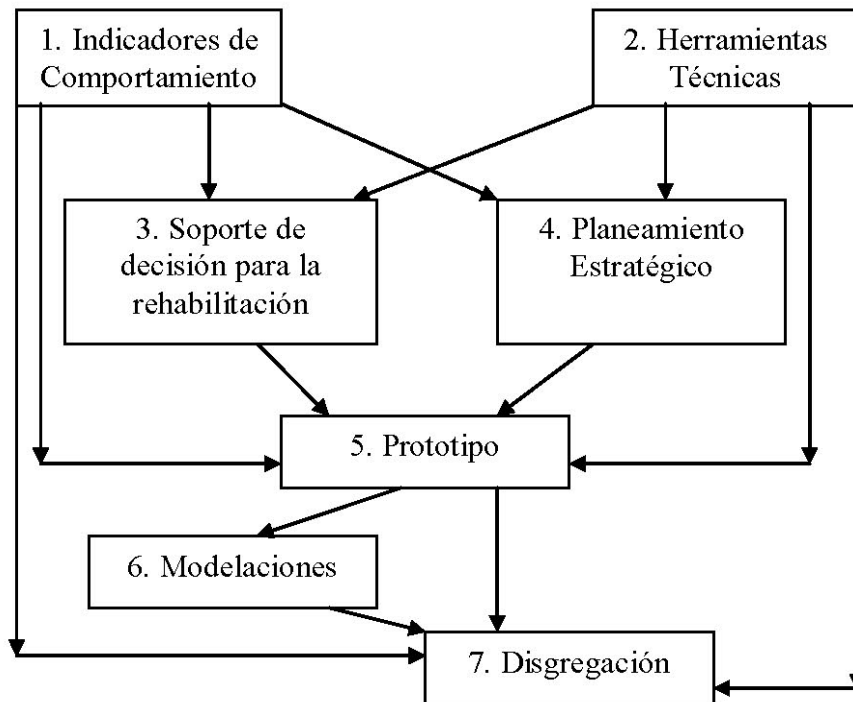


Figura 2-1. [3] Computer Aided Rehabilitation of Water Networks, CARE-W.

Indicadores de Comportamiento.

El objetivo de esta estación es el de seleccionar los indicadores de comportamiento a ser usados en el análisis para encontrar el criterio de rehabilitación. Algunos Indicadores podrán ser predecibles y mostraran la conexión entre la rehabilitación y el comportamiento de la Red.

Herramientas Técnicas.

En esta etapa del proyecto se realiza la búsqueda de herramientas teóricas, computacionales y modelos matemáticos que mejor se ajusten a la formulación del soporte de decisión. Estas herramientas componen el nivel más importante del proyecto debido a que son la vía para transformar la respuesta del sistema ante la aplicación de un modelo determinístico de búsqueda de solución en indicadores específicos de comportamiento siguiendo un soporte de decisión.

Soporte de decisión para la rehabilitación.

Los resultados agregados encontrados a partir de la aplicación del modelo deben ser los argumentos base para el desarrollo de la metodología de rehabilitación. Dichos argumentos deben estar dirigidos dentro de un sistema de soporte involucrando múltiples criterios de decisión.

Planeamiento Estratégico.

En este módulo se analiza el impacto a largo plazo de la aplicación de la metodología de rehabilitación a la red de acueducto. Los efectos hidráulicos y económicos son estudiados con el fin de encontrar el mejor momento para aplicar la rehabilitación correspondiente.

Prototipo.

El prototipo de la metodología debe realizar la interfase de la información de entrada y los resultados encontrados a partir de las estaciones precedentes. Esta información debe ser exportada a otras herramientas técnicas para un procesamiento más detallado y la visualización de los resultados encontrados.

Modelaciones.

Con el fin de validar la metodología encontrada, se deberá realizar una serie de modelaciones con el fin de demostrar la efectividad del procedimiento.

Disgregación.

El resultado será una metodología de rehabilitación que permita uniformizar el estado de presión en una red de acueducto existente siguiendo unos criterios predeterminados en el soporte de decisión.

2.3 Indicadores de Comportamiento para la Optimización de Redes de Acueducto con el fin de Uniformizar el Estado de Presiones.

El funcionamiento es definido como el grado en el que una infraestructura provee los servicios que la comunidad espera sean satisfechos. Dicho funcionamiento es función de la efectividad y de la confiabilidad de ciertos indicadores. La implementación de medidas de funcionamiento como herramientas de control es la única manera de garantizar que el estado de servicio de una red de distribución sea el mejor posible dadas unas restricciones [5].

El estado de servicio involucra principalmente el caudal de demanda y la presión con que se debe entregar dicha demanda en cada uno de los nodos de la red. Al permanecer constante el caudal de demanda, la presión es el principal aspecto en la operación del sistema de distribución que debe ser controlado.

Se tienen dos niveles de presión, uno mínimo y uno máximo. El primero corresponde al nivel mínimo de energía encontrado luego de que el sistema entrega el caudal de diseño demandado por el nodo. El segundo corresponde al nivel máximo de energía correspondiente a los niveles estáticos, es decir, cuando no haya flujo en movimiento a través de la red de distribución pero sobre ésta esté actuando la máxima cabeza producida por los tanques de abastecimiento o por estaciones elevadoras de presión [6].

La presión máxima no debe ser mayor a la presión de trabajo máxima que puede soportar cada uno de los materiales de las tuberías, establecidos en las normas técnicas correspondientes a cada material. El control sobre la presión busca garantizar un nivel mínimo de agua no contabilizada simultáneamente con la optimización del servicio, sin alterar aspectos hidráulicos como el tiempo de retención y el volumen de agua almacenado por el sistema de distribución, al mismo tiempo de no disminuir el nivel de calidad de agua entregada.

Es claro que niveles de presión altos aumentan el nivel de fugas en el sistema, además de disminuir la confiabilidad del mismo debido a que dichos niveles afectan directamente la presión de trabajo máxima que puede soportar cada uno de los materiales de las tuberías. Al mismo tiempo niveles bajos, afectan directamente el nivel de consumo en los nodos de la red, es decir que disminuyen el grado de confiabilidad de la presión mínima entregada por el sistema.

Por lo tanto se debe garantizar que el estado de presiones de servicio en todo el sistema cumpla con lo establecido anteriormente, lo cual se logra uniformizando el nivel de presiones sobre toda la red.

Es posible expresar el comportamiento de cualquier sistema en ingeniería en términos de sus cargas y la resistencia. Si $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ es el vector de las variables aleatorias que influyen la carga (L) y/o la resistencia (R) del sistema, la función de comportamiento, $G(X)$, es expresada de la siguiente manera, Ecuación 2.8:

$$G(X) = R - L \quad \text{Ecuación 2.8}$$

La superficie de falla (estado límite), donde $G = 0$, separa todas las combinaciones de X existentes en el dominio de falla de las presentes en el dominio de supervivencia.

El nivel de confiabilidad en el nodo i de la red de distribución de agua potable es evaluado de la siguiente manera, Ecuación 2.9:

$$G_i(X) = H_i(X) - H_i^{\min} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

donde $H_i(X)$ es la presión modelada en el nodo i como función del vector de la capacidad hidráulica en las tuberías, X , y H_i^{\min} es la presión mínima permitida en el nodo i . Por lo tanto para evaluar la confiabilidad en cada uno de los nodos de la red de distribución, se debe especificar la función de comportamiento, Ecuación 2.9, en cada nodo y , mediante el seguimiento de alguna metodología, encontrar las combinaciones existentes en el dominio de supervivencia.

A partir de la definición de confiabilidad en el nodo i de la red de distribución, es necesario plantear una medida de confiabilidad para todo el sistema de distribución. Lo que se busca con la metodología de optimización de redes de acueducto con el fin de uniformizar el estado de presiones es minimizar la función de comportamiento en cada nodo de la red de distribución, Ecuación 2.10:

$$G_i(X) = \text{MIN} [H_i(X) - H_i^{\min}] \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Lo anterior, como se verá más adelante, se logra al maximizar el Índice de Resiliencia (I_r) y el Coeficiente de Uniformidad (CU) al mismo tiempo de minimizar la Desviación Estándar (DESV) del estado de presiones en los nodos de consumo.

2.3.1 Índice de Resiliencia.

Las pérdidas internas de presión disminuyen la confiabilidad del sistema. El incremento en las pérdidas durante las condiciones de falla puede ser conocido si la potencia disponible para ser disipada por el sistema excede la que realmente disipa el mismo. Basado en esta premisa se define el Índice de Resiliencia [7].

Todini (2000) propuso el siguiente Índice de Resiliencia, basado en el concepto que la potencia de entrada en una red es igual a la potencia perdida internamente por el sistema ocasionada por los efectos de la fricción más la potencia entregada en los nodos de demanda, Ecuación 2.11:

$$P_{inp} = P_{int} + P_{out} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

La potencia total de entrada incluye la potencia suministrada por una bomba y la suministrada por los embalses, Ecuación 2.12:

$$P_{inp} = \sum_{e=1}^{ne} Q_e H_e + \sum_{i=1}^{n_{pu}} P_i \quad \text{Ecuación 2.12}$$

donde Q_e y H_e son el caudal y la cabeza de entrada; n_e : número de embalses; P_i : potencia por unidad de peso suministrada por la bomba i ; n_{pu} : número de bombas en la red. La potencia total de salida está dada por la Ecuación 2.13:

$$P_{out} = \sum_{j=1}^{nn} Q_j H_j \quad \text{Ecuación 2.13}$$

donde Q_j : demanda en el nodo j ; H_j : es la presión con la cual se satisface la demanda Q_j ; y nn : es el número de nodos de toda la red. Por lo tanto el Índice de Resiliencia de la red se define en la Ecuación 2.14:

$$I_r = 1 - \frac{P_{int}}{P_{int}^{max}} \quad \text{Ecuación 2.14}$$

donde P_{int} : es la potencia disipada por la red; y P_{int}^{max} : máxima potencia que puede ser disipada internamente por la red para garantizar la demanda Q y la presión mínima H^* requerida en cada uno de los nodos. Al sustituir los valores apropiados se encuentra la Ecuación 2.15.

$$DES\bar{V} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (P_j - \bar{P})^2}{nm - 1}} \quad \text{Ecuación 2.17}$$

2.3.4 Tiempo de retención de agua en la red.

El tiempo de retención es el tiempo que tarda una gota de agua en recorrer de un extremo al otro una tubería bajo las condiciones de presión y velocidad presentes en la red, Ecuación 2.18.

$$t_{vi} = \frac{l_i}{V_i} \quad \text{Ecuación 2.18}$$

donde V_i y l_i son la velocidad y la longitud de la tubería i respectivamente.

Por lo tanto el Tiempo de retención de la red de distribución es el Tiempo ponderado de retención de todas las tuberías, el cual se calcula al ponderar cada tiempo particular de tubería con el caudal transportado por la misma, Ecuación 2.19.

$$t_{vr} = \frac{\sum_{i=1}^{N_T} t_{vi} Q_i}{\sum_{i=1}^{N_T} Q_i} \quad \text{Ecuación 2.19}$$

donde Q_i es el caudal transportado por la tubería i .

Este es una medida del período de tiempo en el cual el agua es almacenada por la red dada una configuración de tuberías. Se busca reducir ó minimizar su cambio para efectos de calidad de agua en el sistema al realizar trabajos de mantenimiento y calibración de redes.

2.3.5 Volumen en la red.

Debido a que la configuración de tuberías trabaja como un sistema de almacenamiento momentáneo, cuyo período de tiempo es equivalente al tiempo de viaje, el volumen total de agua almacenado es equivalente a la suma del volumen almacenado por cada una de las tuberías, Ecuación 2.20.

$$V_r = \sum_{i=1}^{N_T} l_i \frac{\pi d_i^2}{4} \quad \text{Ecuación 2.20}$$

siendo d_i el diámetro de la tubería i .

Al igual que el Tiempo de retención, se busca que la alteración que sufra el Volumen en la red sea mínima para efectos no sólo de calidad de agua sino por razones de economía del recurso.

2.3.6 Perjuicio hidráulico.

El Perjuicio hidráulico es una medida relativa del Índice de Resiliencia para cada una de las configuraciones encontradas, el cual indica que la optimización del proceso de una a otra configuración va siendo cada vez menor a medida que se maximiza la conservación de energía.

El Perjuicio hidráulico se calcula a partir de la Ecuación 2.21.

$$\text{Perjuicio}(k) = 1 - \text{Beneficio}(k) = 1 - [I_r(k) - I_r(1)] \quad \text{Ecuación 2.21}$$

donde k representa el número de cambios realizados durante el proceso.

2.4 Herramientas Técnicas utilizadas para la Optimización de Redes de Acueducto con el fin de Uniformizar el Estado de Presiones.

Los avances computacionales de los últimos tiempos han permitido amplificar el campo de acción de metodologías de diseño de redes de distribución. Debido a que las metodologías de hace algunos años no permitían optimizar el diseño, se generaban sistemas sobre-diseñados. Por lo tanto la necesidad de rehabilitar las redes existentes con el fin de garantizar un servicio óptimo, desde el punto de vista económico, partiendo de la estructura definida se convirtió en el principal objetivo de muchos trabajos implementando diversas metodologías de rehabilitación; una de ellas es desarrollar un algoritmo determinístico como guía para la solución del problema particular de uniformizar el estado de presiones en todos los sectores de la red de distribución.

Como se mencionó anteriormente, al tener niveles altos de presión se genera un incremento en el nivel de pérdidas de energía hidráulica en el sistema, ocasionando la disminución del grado de confiabilidad para enfrentar eventuales fallas en el mismo. Las herramientas utilizadas en la metodología garantizan no solo la uniformización del estado de presiones de consumo sino al mismo tiempo la disminución de los niveles altos de presión encontrados en diferentes sectores del sistema, aumentando de esta manera la confiabilidad del sistema para la óptima entrega del servicio.

En este trabajo se presenta la metodología desarrollada para uniformizar el estado de presiones de consumo en cada uno de los nodos de la red por medio del desarrollo de un algoritmo determinístico, sin embargo se debe presentar el análisis del método utilizado para realizar el cálculo de la red, previo a la explicación de la metodología.

2.4.1 Análisis de Redes Cerradas.

El análisis parte de la condición de flujo permanente, lo cual garantiza el cumplimiento de las ecuaciones de conservación de masa en cada uno de los nodos de la red, Ecuación 2.22, [4]:

$$\sum_{j=1}^{NT_i} Q_{ij} - Q_{D_i} = 0 \quad \text{Ecuación 2.22}$$

donde NT_i es el número de tubos que llegan al nodo i , Q_{ij} es el caudal que es transportado por la tubería ij hacia el nodo i desde el nodo j y Q_{D_i} es el caudal de consumo en el nodo i . Se debe tener en cuenta para efectos de análisis el signo que se le debe asignar, éste es positivo si el caudal va hacia el nodo i y negativo si sale de dicho nodo.

De la misma manera se puede plantear una ecuación de conservación de la energía entre los nodos i y j , a partir de la cual se encuentra la relación entre Q_{ij} y las cabezas en los nodos i y j , Ecuación 2.23.

$$H_j - H_i = \frac{Q_{ij}^2}{2gA_{ij}^2} \left(\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right) \quad \text{Ecuación 2.23}$$

Luego al despejar Q_{ij} , se obtiene, Ecuación 2.24:

$$Q_{ij} = \left(\frac{H_j - H_i}{\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}}} \right)^{1/2} \sqrt{2gA_{ij}} \quad \text{Ecuación 2.24}$$

Por lo tanto al reemplazar este término en la Ecuación 2.22 se tiene lo siguiente:

$$\sum_{j=1}^{NT_i} \left(\frac{H_j - H_i}{\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}}} \right)^{1/2} \sqrt{2gA_{ij}} - Q_{D_i} = 0 \quad \text{Ecuación 2.25}$$

Este tipo de ecuaciones se conocen como ecuaciones de cabeza. En una red se tiene un total de $(Nu-1)$ ecuaciones de este tipo; sin embargo se debe conocer al menos una cabeza de un nodo para poder solucionar este sistema de ecuaciones, en el caso contrario se puede suponer la cabeza en uno de los nodos de la red para luego corregirla progresivamente. Se debe tener en cuenta que este tipo de ecuaciones no son lineales, además que el valor absoluto de las cabezas en los nodos no afectan la distribución de caudales.

Al mismo tiempo, se debe tener en cuenta el mismo análisis para el caso de los circuitos en la red. En primer lugar se presenta la ecuación de continuidad en las uniones que conforman el circuito, la cual corresponde a la Ecuación 2.22, y la ecuación de conservación de energía alrededor del circuito, Ecuación 2.26:

$$\sum_{j=1}^{NT_i'} h_{fij} + \sum_{j=1}^{NT_i'} h_{mij} = 0 \quad \text{Ecuación 2.26}$$

donde NT_i' es el número de tubos del circuito i . Al utilizar la ecuación de Darcy-Weisbach, Ecuación 2.1, se obtiene, Ecuación 2.27:

$$\sum_{j=1}^{NT_i'} \frac{Q_{ij}^2}{2gA_{ij}^2} \left(\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right) = 0 \quad \text{Ecuación 2.27}$$

Estas ecuaciones se conocen con el nombre de ecuaciones de caudal. En total se tienen NC ecuaciones de caudal, donde NC es el número de circuitos que conforman la red. De lo anterior se puede concluir que para el análisis de redes cerradas se tiene en total $NC + (UN-1)$ ecuaciones que pueden ser utilizadas para encontrar las cabezas en cada nodo, suponiendo o conociendo de antemano la cabeza en algún nodo de la red.

Es claro que este conjunto de ecuaciones no puede ser resuelto fácilmente debido a la relación no lineal entre sus variables. Sin embargo se ha desarrollado un método muy eficaz para la resolución de este problema, el método del gradiente.

2.4.2 Método del Gradiente.

El método del gradiente fue desarrollado por los profesores Enda O'Connell y Ezio Todini hacia 1984. El principal objetivo era el de optimizar el tiempo de cálculo de las redes al manipular las matrices que hacen parte del análisis de redes de distribución de agua [4]. Esto fue el primer paso hacia el desarrollo de una metodología para lograr la calibración de redes existentes y por lo tanto permitió establecer un marco de referencia para la óptima operación y el control de la distribución de agua potable bajo las mejores condiciones posibles [4].

Además de las ecuaciones mencionadas anteriormente, el método del gradiente tiene en cuenta la posible existencia de bombas en algunos de los tubos de la red. Por lo tanto el comportamiento de las pérdidas es analizado por el método de la siguiente manera, Ecuación 2.28:

$$h_f = \alpha Q_{ij}^n + \beta Q_{ij} + \gamma \quad \text{Ecuación 2.28}$$

donde n es un exponente que depende de la ecuación de fricción utilizada, para el caso de Darcy-Weisbach es de 2; α , β y γ son parámetros característicos del tubo y la bomba. El primero de ellos corresponde una función $f(d, l, f$ y $g)$ y últimos dos parámetros sólo son necesarios cuando existe una bomba en el tubo. Se sabe que el factor de fricción, f , depende también del caudal transportado por la

tubería, el proceso debe incorporar el cálculo de este factor a partir de algún método mencionado en el capítulo 2.1.1, en el cual se analizó el efecto de las pérdidas de energía por efectos de la fricción presente en las tuberías generada por el flujo del caudal a través de ellas.

Para desarrollar el método del gradiente se realizan las siguientes definiciones:

NT: Número de tuberías de la red.

NN: Número de nodos con cabeza piezométrica desconocida.

[A12]: Matriz de conectividad asociada a cada uno de los nodos de la red. Su dimensión es $NT \times NN$ con solo dos elementos diferentes de cero en la i -ésima fila:
 -1 en la columna correspondiente al nodo inicial del tramo de tubería i .
 1 en la columna correspondiente al nodo final del tramo de tubería i .

NS: Número de nodos de cabeza fija o conocida.

[A10]: Matriz topológica tubería a nodo para los NS nodos de cabeza fija. Su dimensión es $NT \times NS$ con un valor igual a -1 en las filas correspondientes a los tramos de tubería conectados a nodos de cabeza fija.

Con las anteriores definiciones se presenta la ecuación para la pérdida de cabeza en cada tramo de tubería, Ecuación 2.29:

$$[A11][Q] + [A12][H] = -[A10][Ho] \quad \text{Ecuación 2.29}$$

La Ecuación 2.29 representa la ecuación de conservación de energía sobre la red en la cual:

[A11]: es una matriz diagonal de dimensión $NT \times NT$ definida de la siguiente manera:

$$[A11] = \begin{bmatrix} \alpha_1 Q_1^{n1-1} + \beta_1 + \frac{\gamma_1}{Q_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \alpha_2 Q_2^{n2-1} + \beta_2 + \frac{\gamma_2}{Q_2} & \dots & \\ \dots & \dots & \dots & \\ 0 & \dots & \dots & \alpha_{NT} Q_{NT}^{nNT-1} + \beta_{NT} + \frac{\gamma_{NT}}{Q_{NT}} \end{bmatrix}$$

[Ho]: Vector de cabezas piezométricas fijas con dimensión $NS \times 1$.

[H]: Vector de cabezas piezométricas desconocidas con dimensión $NN \times 1$.

[Q]: Vector de caudales con dimensión $NT \times 1$.

Por otro lado se tiene la ecuación de continuidad para cada uno de los nodos de la red, Ecuación 2.30:

$$[A21][Q] = [q] \quad \text{Ecuación 2.30}$$

donde:

[A21]: Matriz transpuesta de **[A12]**.

[q]: Vector de demanda o de oferta en cada nodo de la red, con dimensión $NT \times 1$.

Es posible representar de una manera más clara éstas dos ecuaciones de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} [A11] & [A12] \\ [A21] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [Q] \\ [H] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[A10][H_0] \\ [q] \end{bmatrix}$$

Debido a la naturaleza no lineal de las ecuaciones presentadas, es necesario utilizar algún proceso iterativo para encontrar la cabeza en cada nodo y el caudal transportado por cada tubería.

El método del gradiente consiste en hacer una expansión truncada de Taylor. Al aplicar el operador gradiente se obtiene:

$$\begin{bmatrix} [N][A11] & [A12] \\ [A21] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [dQ] \\ [dH] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [dE] \\ [dq] \end{bmatrix}$$

donde:

[N]: Matriz diagonal (**n1, n2,.....nNT**) con dimensión $NT \times NT$.

[A11]': Matriz con dimensión $NT \times NT$ definida como:

$$[A11] = \begin{bmatrix} \alpha_1 Q_1^{n1-1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \alpha_2 Q_2^{n2-1} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \alpha_{NT} Q_{NT}^{nNT-1} \end{bmatrix}$$

Al final de cada iteración $[dE]$ representa la corrección que debe se le debe aplicar a cada una de las cabezas en cada nodo de la red y $[dq]$ la corrección a cada uno de los caudales en la red. A realizar el desarrollo matemático se obtiene la Ecuación 2.31 para la corrección de cabezas y la Ecuación 2.32 para la corrección de caudales:

$$[dE] = [A11][Q_i] + [A12][H_i] + [A10][H_0] \quad \text{Ecuación 2.31}$$

$$[dq] = [A_{21}][Q_i] - [q] \quad \text{Ecuación 2.32}$$

Por lo tanto se tiene por objetivo solucionar estas dos ecuaciones teniendo en cuenta que para cada iteración se tiene:

$$\begin{aligned} [dQ] &= [Q_{i+1}] - [Q_i] \\ [dH] &= [H_{i+1}] - [H_i] \end{aligned}$$

La solución puede calcularse resolviendo el siguiente sistema:

$$\begin{bmatrix} [dQ] \\ [dH] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [N][A_{11}] & [A_{12}] \\ [A_{21}] & [0] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [dE] \\ [dq] \end{bmatrix}$$

Mediante álgebra matricial es posible calcular en forma explícita $[H_{i+1}]$ y $[Q_{i+1}]$, necesarios para cada iteración, Ecuación 2.33 y Ecuación 2.34 respectivamente:

$$[H_{i+1}] = -\{[A_{21}][N][A_{11}]^{-1}[A_{12}]\}^{-1} = \{[A_{21}][N][A_{11}]^{-1}([A_{11}][Q_i] + [A_{10}][H_0] - [A_{21}][Q_i] - [q])\}$$

Ecuación 2.33

$$[Q_{i+1}] = \{[I] - ([N][A_{11}]^{-1}) - [A_{11}]\}[Q_i] - \{([N][A_{11}]^{-1})^{-1}([A_{12}][H_{i+1}] + [A_{10}][H_0])\}$$

Ecuación 2.34

2.4.3 Modelo de Rehabilitación y Mantenimiento.

2.4.3.1 UtilNets (Unión Europea).

UtilNets es un sistema de apoyo de decisión (decision support system DDS) para la planeación de la rehabilitación y optimización del mantenimiento de las redes de acueducto. El DSS realiza predicciones de vida de las tuberías, a partir de modelos de confiabilidad, y determina las consecuencias de mantenimiento con el tiempo para optimizar la rehabilitación [8].

El prototipo es el resultado de 3 años de investigación y desarrollo financiado por la Unión Europea. Se desarrolló a partir del trabajo conjunto de ingenieros estructurales, hidráulicos y científicos especializados en sistemas de información geográfica, bases de datos correlativas y sistemas expertos, con el fin de la consecución de una herramienta práctica para la rehabilitación de redes de acueducto, la cual incluye lo siguiente:

- Modelos Probabilísticos que dan una serie de medidas necesarias para el análisis de la hidráulica, calidad del agua y la falla de segmentos de tubería durante los próximos años, frente a la modelación de los niveles de servicio.

- El análisis de las consecuencias cualitativas y cuantitativas de cada una las opciones de rehabilitación encontradas.
- Selección del nivel de rehabilitación óptimo para cada uno de los segmentos de tubería.

El principal objetivo de la aplicación de las metodologías de rehabilitación de redes de acueducto es el de mantener la capacidad hidráulica al mismo tiempo de evitar problemas futuros en el nivel de servicio. El método más común es el control en tiempo real de los niveles de presión de servicio y flujo en las tuberías durante la operación de la red, en el cual si por alguna razón el flujo o el nivel de presión cambian, esto podría ser una señal de la presencia de alguna falla en el sistema. Dicho evento está representado por la falla en alguna tubería o la presencia de fugas en el sistema.

La información recolectada mediante el control en tiempo real es evaluada con el fin de estimar la necesidad futura de rehabilitación. El modelo esperado de la falla de una tubería es el factor crítico para el análisis de confiabilidad. La resistencia futura de la tubería contra la falla puede ser estimada por métodos determinísticos de probabilidad, los cuales están clasificados en tres grupos:

1. Procesos de conteo y técnicas de extrapolación.

Estos métodos se basan en el registro de las fallas presentadas en un sistema de acueducto durante un período definido. Frecuencias de falla de tuberías simples, o grupos de tuberías con diferentes propiedades, muestran la tendencia de la falla. Al incrementar la tasa de falla se incrementa la tasa de rehabilitación, por lo tanto las futuras fallas se encuentra mediante la extrapolación de los datos históricos.

2. Procesos de desarrollo de la falla.

Mediante la implementación de un modelo estocástico de supervivencia, el número esperado de fallas durante un período es calculado. Estas funciones de supervivencia se basan en la misma información de los procesos de conteo y las técnicas de extrapolación.

3. Modelación de la optimización de la red a partir de criterios.

El nivel de rehabilitación es modelado siguiendo funciones derivadas a partir de estimaciones de trabajos previos acerca del comportamiento de las tuberías ante niveles de servicio. Esto también puede ser aplicado a otros problemas presentados en las redes de acueducto, como es el caso de la uniformidad de presiones.

UtilNets realiza el análisis de las tuberías mediante la implementación de los siguientes módulos divididos en tres grupos:

- A. Análisis:

- A.1. Análisis de la confiabilidad estructural.
- A.2. Análisis de la confiabilidad hidráulica.
- A.3. Calidad del agua.
- A.4. Confiabilidad del servicio.

B. Optimización:

- B.1. Opciones y costo de las mismas para la rehabilitación de redes de acueducto.
- B.2. Consecuencias no cuantificables de la presentación de fallas.

C. Información específica.

- C.1. Confiabilidad de la red.

A.1. Módulo de Análisis de Confiabilidad Estructural.

Este módulo analiza el comportamiento estructural de las tuberías sobre el tiempo. El decrecimiento de la resistencia es comparado con la presión interna ejercida por el agua y las cargas externas (tráfico, suelo y temperatura). A partir del monitoreo se obtienen las características de operación de la red de distribución (profundidad de las tuberías y esfuerzos aplicados sobre la misma), el límite de operación (esfuerzo de falla de las tuberías) y las respectivas distribuciones de probabilidad. Por lo tanto cuando la operación del sistema alcanza los límites máximos que puede soportar, el sistema en general comienza a trabajar de manera insatisfactoria y como consecuencia se acerca al punto de falla.

A.2. Módulo de Análisis de Confiabilidad Hidráulica.

El comportamiento hidráulico se analiza a partir de dos estados límites:

- Máxima demanda necesaria.
- Presión mínima de operación.

El método consiste en el análisis de la información encontrada a partir del monitoreo. Se define un grado de confiabilidad hidráulica como función del tiempo y de la magnitud de la diferencia entre las características de operación de la red (factor de fricción, pérdidas de cabeza, tiempo de retención, volumen transportado, etc.) y los límites de operación (mínima presión y máximo caudal).

A.3. Módulo de Análisis de la Calidad del Agua.

En este módulo se analiza el efecto que ejerce las condiciones de la tubería sobre la calidad del agua. Se basa en literatura encontrada acerca de la interacción entre los materiales de las tuberías y parámetros de calidad de agua.

B.1. Opciones y costo de rehabilitación de redes de acueducto.

Los tres módulos mencionados anteriormente presentan las predicciones de falla de la red analizada, por lo tanto se genera una serie de soluciones factibles de rehabilitación. Para estas soluciones se encuentra el costo asociado con cada una, para luego seleccionar la opción técnicamente factible de mínimo costo a aplicar.

B.2. Consecuencias no cuantificables de la presentación de fallas.

La falla de una tubería genera consecuencias secundarias sobre otras estructuras, lo cual se debe tener en cuenta al momento de analizar las prioridades de rehabilitación. Se realiza una tabla incluyendo cada consecuencia individual, clasificando si la falla que la deriva es hidráulica, estructural ó como una combinación de las dos. Las consecuencias generadas a partir de una falla hidráulica solo afectan la red de distribución, mientras que las estructurales afectan tanto el sistema de distribución como otras utilidades.

C.1. Confiabilidad de la Red.

Las redes de distribución generalmente tienen un alto grado de redundancia, ésta es una medida de la inter-conectividad que puede ser explorada. UtilNets tiene un módulo que permite a los ingenieros entender la confiabilidad de la red sin necesidad de recurrir a numerosas iteraciones teniendo en cuenta dos medidas de confiabilidad:

- Conectividad de los nodos de demanda, es decir la probabilidad del completo aislamiento de cada nodo de demanda desde el punto de abastecimiento.
- Estado de servicio adecuado, el cual se basa en una serie de criterios aplicados a un modelo hidráulico de rehabilitación.

2.5 Soporte de Decisión para la Optimización de Redes de Acueducto con el fin de Uniformizar el Estado de Presiones.

Existe una gran variedad de métodos para lograr la rehabilitación de redes de distribución. El método a ser escogido depende principalmente de las condiciones locales, como el tipo del problema, el tamaño de la tubería etc. Paralelo a esto el costo de rehabilitación depende al mismo tiempo del método aplicado y la tecnología disponible.

Los criterios para lograr la rehabilitación de redes de distribución son analizados mediante diversas herramientas. Sin embargo es necesario desarrollar un procedimiento que involucre cada uno de los criterios dentro de un análisis multi-objetivo.

Dentro de los algoritmos generales de optimización se tienen esquemas de enumeración; en los cuales cada una de las posibles soluciones es evaluada, algoritmos estocásticos; en los que se realizan modelaciones probabilísticas del problema para analizar la respuesta y plantear la solución; y algoritmos determinísticos. Estos últimos han demostrado ser una herramienta muy efectiva para resolver problemas imprecisos de decisión, debido a la facilidad de diseño e implementación y además porque logran llegar a la solución de manera sencilla y rápida.

2.5.1 Algoritmos Determinísticos.

2.5.1.1 Algoritmo greedy

Los algoritmos tipo greedy son los más ambiciosos de todo el grupo de algoritmos determinísticos. Son generalmente utilizados en problemas de optimización, tomando decisiones a partir de información básica sin importar lo que suceda en el futuro [9].

Se tienen muchas formas de resolver un problema de optimización. Para construir la solución del problema, se tiene un conjunto de candidatos (las tuberías de la red de distribución) con los cuales se inicia la búsqueda de cual de los candidatos que hacen que el proceso sea óptimo.

Para resolver el problema, se tiene un conjunto de candidatos que constituyen el espacio solución, entre los cuales se encuentran aquellos que optimizan el proceso (minimizan ó maximiza si es el caso). El algoritmo tipo greedy se desarrolla paso a paso. Al inicio se tiene dos conjuntos uno de candidatos considerados escogidos y el de candidatos considerados no escogidos, los cuales se encuentran vacíos. En cada paso se adiciona el mejor de los candidatos al primer conjunto y se van encontrando aquellos que no solucionan de manera óptima el problema, los cuales pasan al segundo conjunto.

El proceso de identificación del candidato que debe considerarse y escogerse involucra la implementación de tres funciones. La primera, función de selección no objetiva, debe revisar si el candidato considerado es solución del problema, sin importar la optimización del mismo. La segunda, función de factibilidad, revisa si la escogencia del candidato considerado es factible o no, aún sin tener en cuenta la optimización. La tercera es una función de selección objetiva, la cual indica si el candidato que se está analizando, a partir del conjunto de candidatos restantes no considerados, optimiza el proceso de solución. Esta última función es la que encamina el proceso de búsqueda de solución óptima al problema, al mismo tiempo encuentra aquellos candidatos que nunca serán solución óptima los cuales no son considerados nuevamente en el proceso.

Al final se tiene un conjunto de candidatos que conforman la solución del problema y otro conjunto de candidatos no solución, entre los cuales se encuentra los que han sido considerados, pero no optimizan el proceso, y los que nunca han sido considerados.

2.6 Descripción del Algoritmo determinístico

2.6.1 Objetivo del Algoritmo Determinístico.

Como se describió anteriormente, los problemas más frecuentes presentes en redes de distribución de agua potable están relacionados con el estado de presión de servicio en los nodos de consumo.

El nivel de pérdidas de energía y la presencia de fugas en el sistema hacen que se deba afectar de alguna manera el estado de presiones para hacer una entrega óptima del servicio. Al uniformizar el estado de presión en toda la red, se está aumentando el grado de confiabilidad de la misma desde el

punto de vista hidráulico, debido a que se maximiza la conservación de energía. Si a esto se le adiciona la disminución de la cabeza de entrada, con el fin de disminuir el nivel de presión en la red, no sólo se uniformiza el estado de presión, sino que se minimiza el rango de presiones en cada uno de los nodos y se acerca a la presión mínima establecida por normatividad.

La uniformización del estado de presiones de servicio y la disminución del rango de presiones se logra a partir de un análisis de conservación de energía de la red, como se verá más adelante. Por lo tanto, el principal objetivo del desarrollo del algoritmo determinístico es el de encontrar la solución óptima a este problema, maximizando el grado de conservación de energía, encontrándose de esta manera la uniformidad del estado de presiones en toda la red, al mismo tiempo de minimizar el rango entre el cual se encuentran las presiones en los nodos de consumo de la red.

2.6.2 Estructura del Algoritmo.

El algoritmo determinístico debe encontrar la solución óptima al proceso de uniformización del estado de presiones en los nodos de consumo. El espacio solución corresponde a las tuberías que conforman el sistema, a partir del cual se escogen las que logren cumplir de manera óptima con el objetivo mencionado. Esta selección se basa en la modificación de la tubería escogida. Sin embargo, cada tubería está caracterizada por cuatro parámetros (diámetro, material, longitud y el coeficiente de pérdidas menores), por lo tanto se debe escoger cual de éstos es el que debe modificarse en el proceso de selección de tubería. A partir de la Ecuación 2.1, se encuentra que las pérdidas por fricción son directamente proporcionales al diámetro de la tubería elevado a la quinta potencia para un caudal determinado, Ecuación 2.35:

$$f = d^5 g \frac{hf}{8lQ^2} \quad \text{Ecuación 2.35}$$

Igualmente, el régimen de flujo depende del diámetro de la tubería, lo cual se observa en el número de Reynolds, Ecuación 2.2.

Para el cálculo del factor de fricción, Ecuación 2.6, se encuentra que éste depende del material de la tubería (k_s). Sin embargo, k_s de manera individual no permite analizar el efecto hidráulico que ejerce sobre la fricción. Por lo tanto se debe relacionar con el diámetro de la misma, debido a que dos tuberías del mismo material pero con diámetros muy diferentes no van a tener el mismo efecto de resistencia sobre el fluido, la que tenga el diámetro más pequeño es la que mayor efecto sobre las pérdidas va a generar bajo las mismas condiciones de caudal y cabeza disponible.

De esta manera se concluye que el parámetro que se debe modificar en la tubería es el diámetro, ya que la longitud es una característica fija del sistema, la rugosidad relativa es función del mismo diámetro y el coeficiente de pérdidas menores ($\sum k_m$). Este último es un parámetro que relaciona la pérdida de energía ocasionada por los accesorios utilizados para la construcción de la tubería ó por la implementación de una válvula para controlar el estado de presión.

Los pasos que se deben seguir son los siguientes:

1. Las variables conocidas son las enumeradas en la Tabla 2-1.

Q_j, H_j	Los caudales de demandada y la presión en cada uno de los nodos.
H_j^*	Nivel de presión mínima establecido por normatividad,
d, l, k_s	Diámetro, longitud y rugosidad de cada la cada una de las tuberías.
Q_e, H_e	Caudal y Presión de entrada de cada una de las fuentes de suministro.
P_i	Potencia suministrada por la bomba cada bomba, si es el caso.
NT	Número de tubos que conforman la red de distribución.
NN	Número de nodos de consumo en el sistema.
NR	Número de Fuentes de suministro.
npu	Número de bombas en el sistema
D_{max}	Diámetro máximo permitido en el sistema establecido por normatividad.

Tabla 2-1 Características conocidas de la red de distribución

2. Luego de reconocer cada una de las características del sistema de distribución se calcula el vector de Índice de Resiliencia de la siguiente manera:
 - Aumentar el diámetro de la primera tubería y calcular el Índice de Resiliencia, Ecuación 2.15, con ese cambio.
 - Este primer I_r corresponde al primer valor de este vector, luego se vuelve a dejar el diámetro de la tubería modificada como estaba inicialmente y se continua con la siguiente hasta realizar esto mismo con todas las tuberías.
3. Encontrar la tubería que al modificarse corresponde al máximo I_r . Función de selección no objetiva.
4. Verificar que el diámetro de la tubería encontrada en el paso anterior no supere el diámetro máximo permitido en el sistema establecido por normatividad. Función de factibilidad.
5. Calcular el Coeficiente de Uniformidad y la Desviación, Ecuación 2.16 y Ecuación 2.17 respectivamente, correspondientes al Índice de Resiliencia encontrado.
6. Verificar que se esté maximizando la uniformidad y el Índice de Resiliencia, al mismo tiempo de minimizar la desviación con la selección realizada en los pasos anteriores, optimización del proceso. Función de selección objetiva.
7. Al encontrar la modificación en la tubería que optimiza el proceso, se debe actualizar la configuración de la red de distribución con este cambio para luego reiniciar el proceso a partir de la nueva configuración de tuberías encontrada.
8. En la optimización del proceso, función de selección objetiva de la tubería, se pueden encontrar tuberías que no logran este comportamiento, estas tuberías no deben ser tenidas en cuenta al analizar configuraciones futuras encontradas.

2.6.3 Funciones utilizadas dentro del algoritmo determinístico.

2.6.3.1 Función de selección no objetiva.

La función de selección no objetiva, como su nombre lo indica, escoge dentro del conjunto de candidatos considerados, aquellos que han cumplido con la optimización del proceso y aquellos que no han sido considerados con anterioridad, a la tubería que maximice el Índice de Resiliencia de una configuración de sistema a otra, es decir a la tubería que al aumentar su diámetro al siguiente comercial genere el mayor I_r de todas las modificaciones. Esto no tiene en cuenta el nivel de uniformidad de presiones y el rango de presiones encontrado con la modificación considerada.

2.6.3.2 Función de factibilidad.

Por razones técnicas y normativas, se han establecido reglas para el diseño de redes de distribución. La función de factibilidad es una función de castigo, la cual verifica que el aumento del diámetro en la tubería escogida en cada una de las configuraciones encontradas no supere el diámetro máximo establecido por la norma técnica de diseño. Sin embargo esta función no tiene en cuenta la optimización del proceso.

2.6.3.3 Función de selección objetiva.

El objetivo que se busca con el procedimiento es el de uniformizar el estado de presiones en toda la red de distribución, al mismo tiempo de minimizar el rango de presiones respecto a la presión mínima requerida en los nodos de consumo (H_j^*). Esto se logra maximizando el Índice de Resiliencia, es decir al buscar que la energía disipada por el sistema sea igual a la energía disponible para disipar.

Las tuberías escogidas deben garantizar lo siguiente en cada una de las configuraciones encontradas:

1. $I_{r(k+1)} - I_{r(k)} > 0;$
2. $CU_{(k+1)} - CU_{(k)} > 0;$
3. $DESV_{(k)} - DESV_{(k+1)} > 0;$

Representando los subíndices k y $k+1$, las configuraciones anterior y siguiente respectivamente, encontradas durante el desarrollo del proceso.

La estructura del soporte de decisión es el algoritmo determinístico definido en la Figura 2-2.

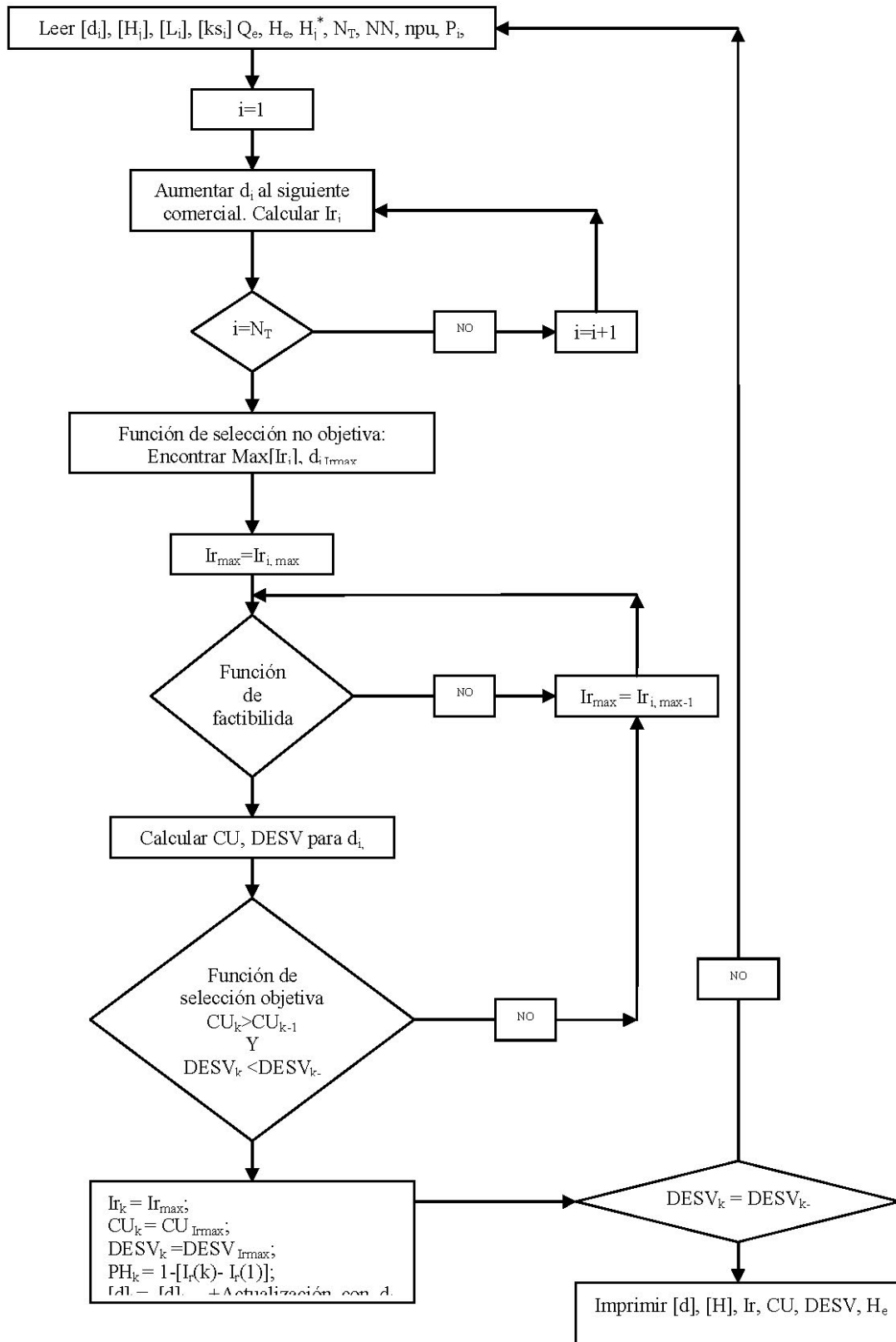


Figura 2-2. Estructura del algoritmo determinístico implementado.

2.7 *Bibliografía.*

- [1] Hoyland, A. and M. Rausand, System Reliability Theory. Wiley series in probability and statistics. 1994, New York: Wiley & Sons, Inc.
- [2] O'Day, D., Organizing and Analyzing Leak and Break Data for Making Main Replacement Decisions. Journal of the American Water Works Association, 1982. 74(November): p. 588-594.
- [3] Computer Aided Rehabilitation of Water Networks, CARE-W.
- [4] "HIDRAULICA DE TUBERIAS", Juan G. Saldarriaga. Primera Edición. Editorial McGraw Hill Interamericana. Santafé de Bogotá, 1998.
- [5] EPA, U.S. Environmental Protection Agency. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, Contract GS-23F-9737H, 2002. Chapter 3: Summary of European Performance Indicators for Water Distribution and Wastewater Collection Infrastructure.
- [6] REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BASICO RAS – 2000.
- [7] Multiobjective Genetic Algorithms for Design of Water Distribution Networks. Journal of Water resources Planning and Management. ASCE Vol. 130:1 2004.
- [8] UTILNETS: A Water Mains Rehabilitation Decision Support System. Thanassis Hadzilacos, Dimitrios Kalles, Nick Preston, Paul Melbourne, Leonidas Camarinopoulos, Michael Eimermacher, Vassilis Kallidromitis, Stamatia Frondistou-Yannas, Sveinung Saegrov. UN.
- [9] "FUNDAMENTALS OF ALGORITHMICS", Gilles Brassard, Paul Bratley. Second Edition. Prentice-Hall, 1998.
- [10] WATER LOSS MANAGEMENT AND TECHNIQUES. German National Report. 2001.

3 PRUEBAS Y RESULTADOS

3.1 Desarrollo del Algoritmo.

Ejemplo 1:

La red implementada como ejemplo es un sistema hipotético de abastecimiento, Figura 3-1. La red mostrada esta compuesta por 55 tubos, 39 nodos y 1 fuente de suministro. En la Figura 3-2 se presenta el plano inicial de presiones en el sistema.

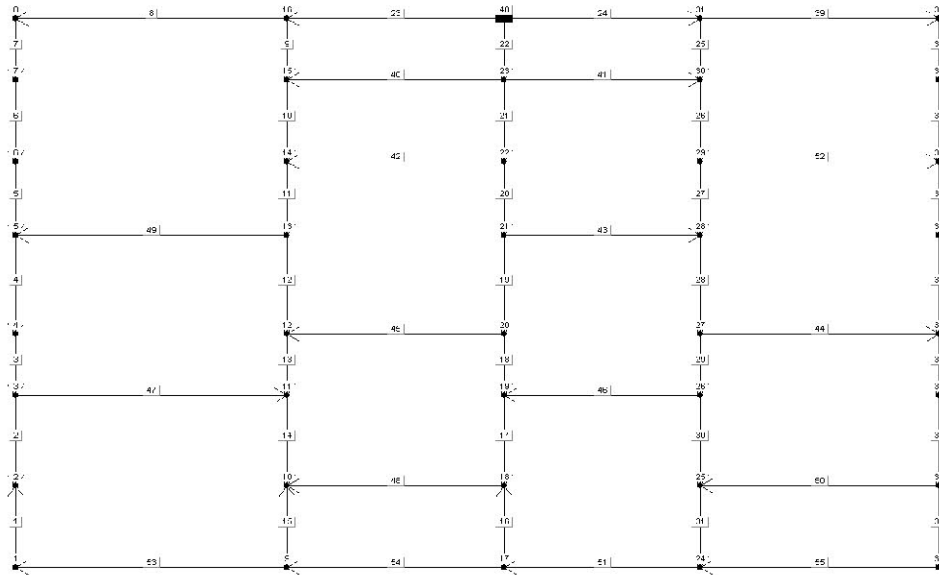


Figura 3-1 Configuración de la red del ejemplo 1.

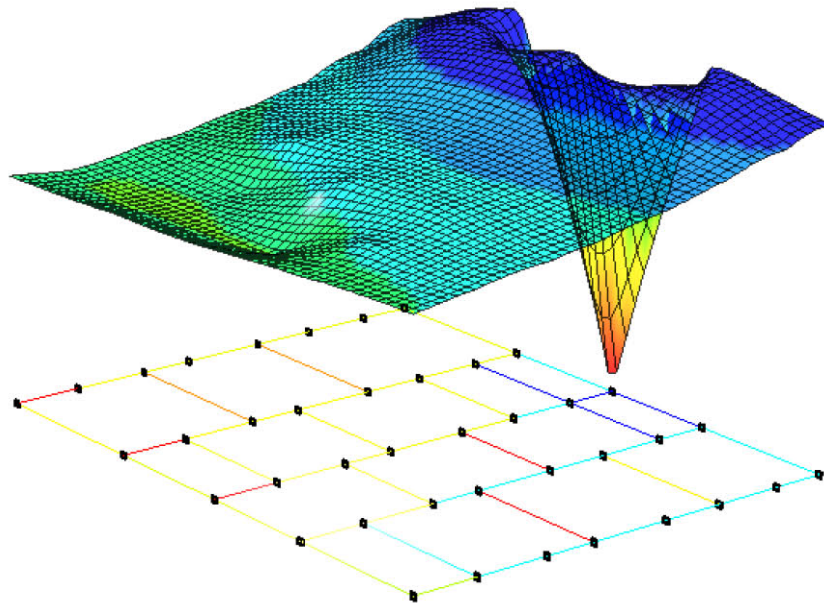


Figura 3-2 Plano inicial de Presiones de la red ejemplo 1.

En la Tabla 3-1 se muestra las características del embalse, en la Tabla 3-2 los nodos de consumo y en la Tabla 3-3 las características de los tubos:

ID	LGH (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
40	50	450	1340	0

Tabla 3-1 Características del embalse.

ID	X (m)	Y (m)	Z (m)	DEMANDA (Lps)
1	0	0	0	1.6
2	0	200	0	3.4
3	0	420	0	3
4	0	570	0	3.2
5	0	810	0	3.4
6	0	990	0	3.1
7	0	1190	0	2.8
8	0	1340	0	1.2
9	250	0	0	2.9
10	250	200	0	6.2
11	250	420	0	5.4
12	250	570	0	5.7
13	250	810	0	6.2
14	250	990	0	5.6
15	250	1190	0	5.1
16	250	1340	0	3.2
17	450	0	0	2.5
18	450	200	0	5.2
19	450	420	0	4.6
20	450	570	0	4.8
21	450	810	0	5.2
22	450	990	0	4.7
23	450	1190	0	4.3
24	630	0	0	2.6
25	630	200	0	5.5
26	630	420	0	4.8
27	630	570	0	5.1
28	630	810	0	5.5
29	630	990	0	4.9
30	630	1190	0	4.6
31	630	1340	0	2.8
32	850	0	0	1.4
33	850	200	0	3
34	850	420	0	2.6
35	850	570	0	2.8
36	850	810	0	3
37	850	990	0	2.7
38	850	1190	0	2.5
39	850	1340	0	1.1

Tabla 3-2 características de los nodos, ubicación y demanda.

ID	NODO1	NODO2	DIAMETRO (mm)	LONGITUD (m)	k_s (m)	k_m
1	2	1	50.8	200	0.0015	0
10	15	14	152.4	200	0.0015	0
11	14	13	152.4	180	0.0015	0
12	13	12	152.4	240	0.0015	0
13	12	11	101.6	150	0.0015	0
14	11	10	101.6	220	0.0015	0
15	10	9	50.8	200	0.0015	0
16	18	17	50.8	200	0.0015	0
17	19	18	101.6	220	0.0015	0
18	20	19	101.6	150	0.0015	0
19	21	20	152.4	240	0.0015	0
2	3	2	101.6	220	0.0015	0
20	22	21	152.4	180	0.0015	0
21	23	22	203.2	200	0.0015	0
22	40	23	254	150	0.0015	0
23	40	16	203.2	200	0.0015	0
24	40	31	254	180	0.0015	0
25	31	30	203.2	150	0.0015	0
26	30	29	203.2	200	0.0015	0
27	29	28	203.2	180	0.0015	0
28	28	27	203.2	240	0.0015	0
29	27	26	203.2	150	0.0015	0
3	4	3	152.4	150	0.0015	0
30	26	25	101.6	220	0.0015	0
31	25	24	101.6	200	0.0015	0
32	33	32	152.4	200	0.0015	0
33	34	33	203.2	220	0.0015	0
34	35	34	203.2	150	0.0015	0
35	36	35	203.2	240	0.0015	0
36	37	36	203.2	180	0.0015	0
37	38	37	203.2	200	0.0015	0
38	39	38	203.2	150	0.0015	0
39	31	39	203.2	220	0.0015	0
4	5	4	152.4	240	0.0015	0
40	15	23	254	200	0.0015	1
41	23	30	254	180	0.0015	1
42	14	22	152.4	200	0.0015	1
43	21	28	50.8	180	0.0015	1
44	27	35	50.8	220	0.0015	1
45	12	20	101.6	200	0.0015	1
46	19	26	152.4	180	0.0015	1
47	3	11	76.2	250	0.0015	1
48	10	18	152.4	200	0.0015	1
49	5	13	76.2	250	0.0015	1
5	6	5	152.4	180	0.0015	0
50	25	33	203.2	220	0.0015	1
51	17	24	152.4	180	0.0015	1
52	29	37	101.6	220	0.0015	1
53	1	9	101.6	250	0.0015	1
54	9	17	152.4	200	0.0015	1
55	24	32	152.4	220	0.0015	1
6	7	6	152.4	200	0.0015	0
7	8	7	152.4	150	0.0015	0
8	16	8	152.4	250	0.0015	0
9	16	15	152.4	150	0.0015	0

Tabla 3-3 Características de los tubos de la red ejemplo 1.

Como se puede observar los diámetros se encuentran entre 50.8 mm y 254 mm, 2 y 10⁷ respectivamente. La red esta conformada por 39 nodos y 55 tuberías, con una longitud total de tubería de 10.9 kms, la presión mínima objetivo es de 15 m.

El estado de presiones presente en el sistema con la configuración inicial de diámetros es el mostrado en la Figura 3-3.

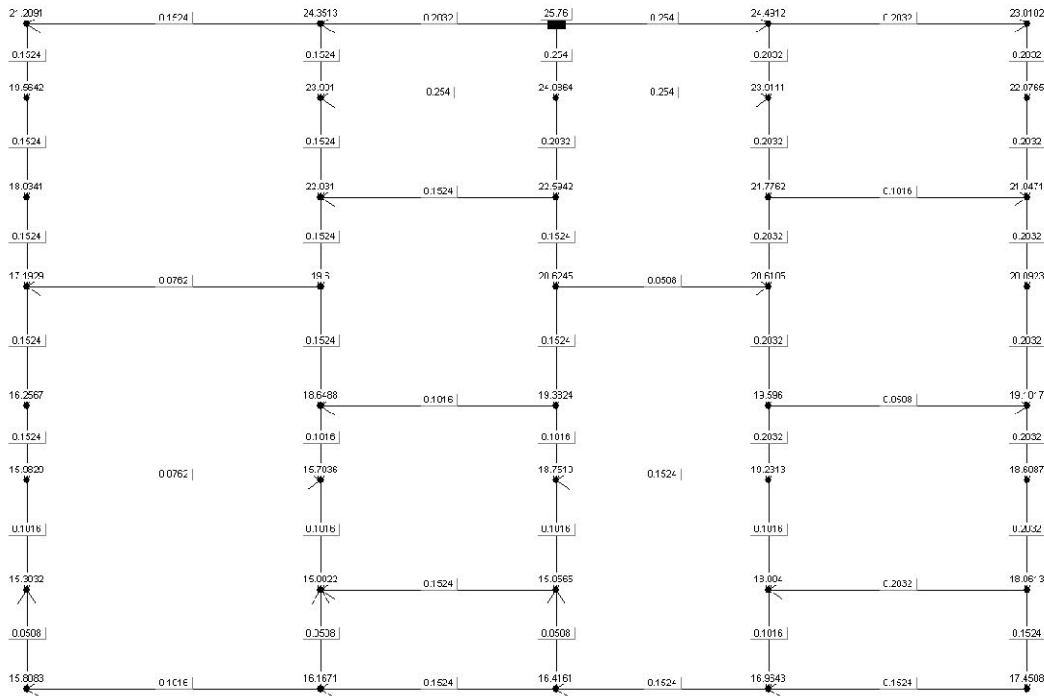


Figura 3-3 Presiones iniciales en los nodos.

Con esta configuración se obtienen los siguientes resultados para indicadores de comportamiento, Tabla 3-4.

# CAMBIOS	I _r	CU	DESV (m)	TIEMPO DE VIAJE (seg)	VOLUMEN (m ³)	H _o	COSTO/1000 (\$)
0	0.81842	0.8951	2.8595	288.949	219.171	25.758	-

Tabla 3-4 Comportamiento inicial de la red del ejemplo 1.

La evolución del proceso de uniformización de la red se muestra en la Tabla 3-5, en la cual se puede observar el número de cambios realizados en la configuración de la red, la modificación realizada en el diámetro en la correspondiente tubería y el porcentaje de longitud cambiada durante el desarrollo del proceso.

# CAMBIOS	#TUDOS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
	TUBO	26	8	17	27	11	10	28	7	6	39	20	21	13	12	30	38	37	36	35	5	27	29	46	
	%LONGITUD	200.00	250.00	220.00	180.00	180.00	200.00	240.00	150.00	200.00	220.00	180.00	200.00	150.00	240.00	220.00	150.00	200.00	180.00	240.00	180.00	150.00	180.00	180.00	
1	1.835	0.254																							
2	4.128	0.254	0.2032																						
3	6.147	0.254	0.2032	J-524																					
4	7.798	0.254	0.2032	J-524	0.254																				
5	9.450	0.254	0.2032	J-524	0.254	C.2032																			
6	11.234	0.254	0.2032	J-524	0.254	C.2032	0.2032																		
7	13.436	0.254	0.2032	J-524	0.254	C.2032	0.2032	0.254																	
8	13.436	0.3048	0.2032	J-524	0.254	L.2032	0.2032	0.254																	
9	14.852	0.3048	0.2032	J-524	0.254	C.2032	0.2032	0.254	0.2032																
10	16.637	0.3048	0.2032	J-524	0.254	C.2032	0.2032	0.254	0.2032	0.2032															
11	18.716	0.3048	0.2032	J-524	0.254	C.2032	0.2032	0.254	0.2032	0.2032	0.254														
12	20.357	0.3048	0.2032	J-524	0.254	C.2032	0.2032	0.254	0.2032	0.2032	0.254	0.2032													
13	22.232	0.3048	0.2032	J-524	0.254	C.2032	0.2032	0.254	0.2032	0.2032	0.254	0.2032	0.254												
14	23.678	0.3048	0.2032	J-524	0.254	C.2032	0.2032	0.254	0.2032	0.2032	0.254	0.2032	0.254	C.1524											
15	25.700	0.3048	0.2032	J-524	0.254	C.2032	0.2032	0.254	0.2032	0.2032	0.254	0.2032	0.254	C.1524	0.2032										
16	27.738	0.3048	0.2032	J-524	0.254	C.2032	0.2032	0.254	0.2032	0.2032	0.254	0.2032	0.254	C.1524	0.2032	0.1524									
17	27.738	0.3048	0.2032	J-524	0.254	C.2032	0.254	0.254	0.2032	0.2032	0.254	0.2032	0.254	C.1524	0.2032	0.1524									
18	27.738	0.3048	0.2032	J-524	0.254	0.254	0.254	0.254	0.2032	0.2032	0.254	0.2032	0.254	C.1524	0.2032	0.1524									
19	29.174	0.3048	0.2032	J-524	0.254	0.254	0.254	0.254	0.2032	0.2032	0.254	0.2032	0.254	C.1524	0.2032	0.1524	0.254								
20	31.039	0.3048	0.2032	J-524	0.254	0.254	0.254	0.254	0.2032	0.2032	0.254	0.2032	0.254	C.1524	0.2032	0.1524	0.254	0.254							
21	32.651	0.3048	0.2032	J-524	0.254	0.254	0.254	0.254	0.2032	0.2032	0.254	0.2032	0.254	C.1524	0.2032	0.1524	0.254	0.254	0.254						
22	34.852	0.3048	0.2032	J-524	0.254	0.254	0.254	0.254	0.2032	0.2032	0.254	0.2032	0.254	C.1524	0.2032	0.1524	0.254	0.254	0.254	0.254					
23	37.852	0.3048	0.2032	J-524	0.251	0.251	0.251	0.251	0.2032	0.2032	0.3048	0.2032	0.251	C.1524	0.2032	0.1524	0.251	0.251	0.251	0.251					
24	34.852	0.3048	0.254	J-524	0.254	0.254	0.254	0.254	0.2032	0.2032	0.3048	0.2032	0.254	C.1524	0.2032	0.1524	0.254	0.254	0.254	0.254					
25	36.514	0.3048	0.254	J-524	0.254	0.254	0.254	0.254	0.2032	0.2032	0.3048	0.2032	0.254	C.1524	0.2032	0.1524	0.254	0.254	0.254	0.254	C.2032				
26	38.195	0.3048	0.254	J-524	0.254	0.254	0.254	0.254	0.2032	0.2032	0.3048	0.2032	0.254	C.1524	0.2032	0.1524	0.254	0.254	0.254	0.254	C.2032	0.3048			
27	39.541	0.3048	0.254	J-524	0.254	0.254	0.254	0.254	0.2032	0.2032	0.3048	0.2032	0.254	C.1524	0.2032	0.1524	0.254	0.254	0.254	0.254	C.2032	0.3048	0.254		
28	39.541	0.3048	0.254	J-524	0.254	0.254	0.254	0.3048	0.2032	0.2032	0.3048	0.2032	0.254	C.1524	0.2032	0.1524	0.254	0.254	0.254	0.254	C.2032	0.3048	0.254		
29	41.193	0.3048	0.254	J-524	0.254	0.254	0.254	0.3048	0.2032	0.2032	0.3048	0.2032	0.254	C.1524	0.2032	0.1524	0.254	0.254	0.254	0.254	C.2032	0.3048	0.254	0.254	

Tabla 3-5 Evolución del proceso de uniformización de presiones. Tubos encontrados y los respectivos cambios en los diámetros.

Los resultados obtenidos durante el desarrollo del soporte de decisión se encuentran en la Tabla 3-6, en la cual se muestra la disminución gradual en la cabeza de entrada que puede lograrse. Esta se calcula al encontrar la diferencia existente entre el nodo de presión mínima en la red y la presión mínima objetivo (H_j^*) y sustraer esta diferencia de la presión inicial a la entrada (H_e).

# CAMBIOS	I_r	PH	CU	DESV (m)	TIEMPO DE VIAJE (seg)	VOLUMEN (m³)	H_e	COSTO/1000 (\$)
0	0.81842		0.89510	2.8595	288.9493	219.1713	25.7580	0
1	0.83029		0.90295	2.7672	292.7091	222.8195	25.2798	32.363
2	0.83958	0.99071	0.91056	2.6064	297.8534	226.3665	24.8723	63.985
3	0.84723	0.98305	0.91591	2.2824	302.2817	228.5960	23.5805	84.241
4	0.85372	0.97656	0.92022	2.1840	306.3275	231.8795	23.3536	113.368
5	0.85971	0.97058	0.92390	2.0716	310.8354	234.4333	23.0211	136.136
6	0.86697	0.96331	0.92801	2.0228	315.8423	237.2708	22.7527	161.433
7	0.87184	0.95844	0.93145	1.9174	321.3988	241.6488	22.5165	200.269
8	0.87648	0.95381	0.93451	1.8713	326.7336	246.1078	22.3625	207.483
9	0.88043	0.94986	0.93729	1.7987	329.9383	248.2360	22.0572	226.456
10	0.88431	0.94598	0.93995	1.6998	333.9481	251.0736	21.7976	251.754
11	0.88784	0.94245	0.94367	1.6601	338.5434	255.0867	21.5629	287.353
12	0.89072	0.93957	0.94528	1.6259	343.0564	257.6405	21.4800	310.121
13	0.89403	0.93626	0.94720	1.6219	348.7813	261.2888	21.4052	342.484
14	0.89722	0.93306	0.94960	1.4921	352.5932	262.8089	21.1668	356.295
15	0.90009	0.93019	0.95129	1.4287	358.0797	266.2140	21.0592	386.652
16	0.90248	0.92781	0.95361	1.2747	363.5096	268.4435	20.5740	406.909
17	0.90466	0.92563	0.95480	1.2561	368.8985	272.0918	20.5116	413.974
18	0.90717	0.92312	0.95628	1.2226	373.6475	275.3752	20.4307	420.333
19	0.90903	0.92126	0.95820	1.1994	376.6708	278.1115	20.3245	444.605
20	0.91122	0.91907	0.96056	1.1579	380.7919	281.7598	20.2096	476.968
21	0.91299	0.91729	0.96218	1.1131	383.8816	285.0432	20.1053	506.095
22	0.91483	0.91546	0.96390	1.0576	388.0613	289.4212	20.0074	544.930
23	0.91634	0.91395	0.96561	1.0554	393.9687	294.3261	19.9686	552.866
24	0.91783	0.91246	0.96688	1.0434	400.3526	298.8865	19.8143	561.698
25	0.91926	0.91102	0.96776	0.9928	404.0787	301.4403	19.6721	584.466
26	0.92059	0.90970	0.96867	0.9676	409.8901	305.4534	19.6008	620.085
27	0.92188	0.90841	0.96963	0.9243	413.4493	308.1896	19.5067	644.358
28	0.92316	0.90712	0.97050	0.8931	420.0658	313.5405	19.4362	653.015
29	0.92454	0.90575	0.97150	0.8524	422.1575	316.0943	19.3851	682.142

Tabla 3-6 Resultados obtenidos con la aplicación de la metodología.

El costo individual de rehabilitación de una tubería se logra a partir de la relación encontrada por [Gutiérrez 2002], Ecuación 3.1:

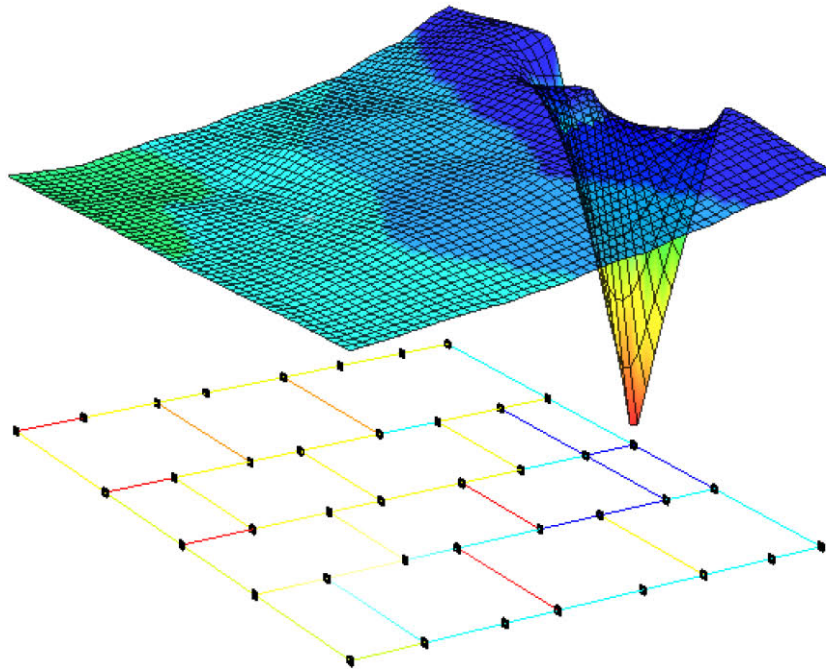


Figura 3-5 Plano de Presiones luego de los 5 cambios realizados en la red ejemplo 1.

# CAMBIOS	I_r	CU	DESV (m)	TIEMPO DE VIAJE (seg)	VOLUMEN (m ³)	H_e	COSTO/1000 (\$)
5	0.85971	0.9239	2.0716	310.835	234.433	23.0211	136,136

Tabla 3-7 Resultados obtenidos luego de 5 cambios en la red ejemplo 1.

- 15 cambios:
 Los cambios se realizaron en las tuberías mostradas en la Figura 3-6.

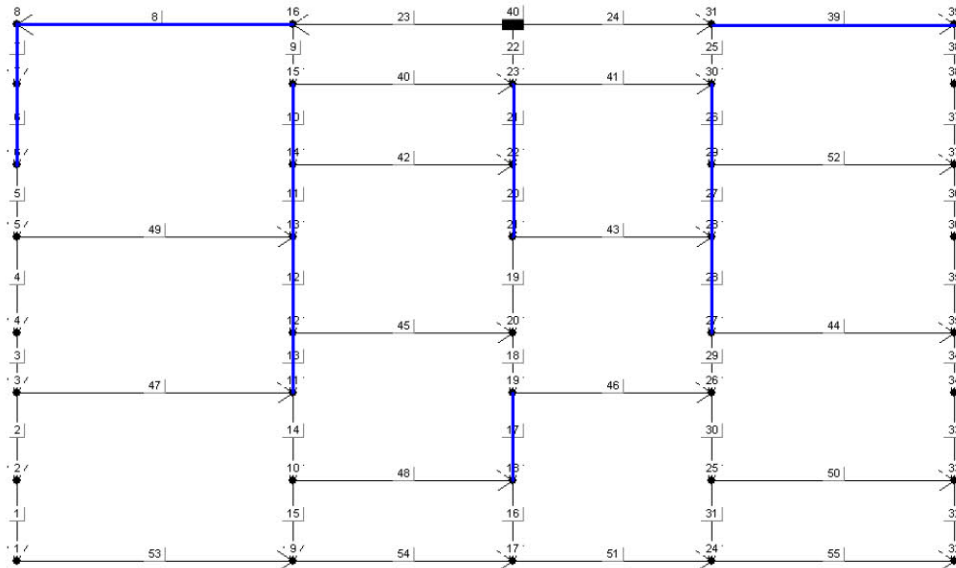


Figura 3-6 Ubicación de los tubos encontrados luego de 15 cambios realizados.

El plano de presiones encontrado es el siguiente, Figura 3-7. Los respectivos índices calculados se encuentran en la Tabla 3-8.

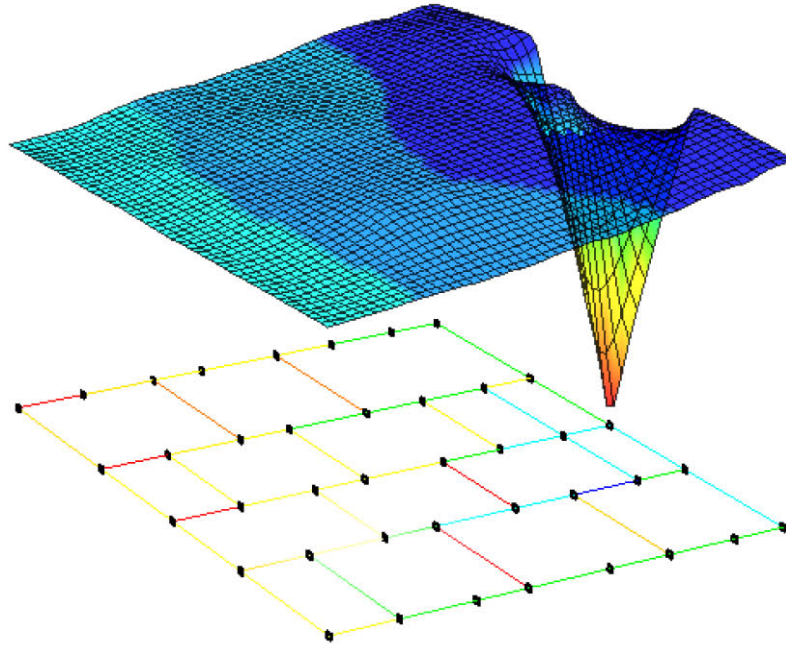


Figura 3-7 Plano de Presiones luego de 15 cambios realizados en la red ejemplo 1.

# CAMBIOS	I_r	CU	DESV (m)	TIEMPO DE VIAJE (seg)	VOLUMEN (m ³)	H_o	COSTO/1000 (\$)
15	0.90009	0.9513	1.4287	358.08	266.214	21.0592	386,652

Tabla 3-8 Resultados obtenidos luego de 15 cambios realizados en la red ejemplo 1.

- 25 cambios:
 Los cambios se realizaron en las tuberías mostradas en la Figura 3-8.

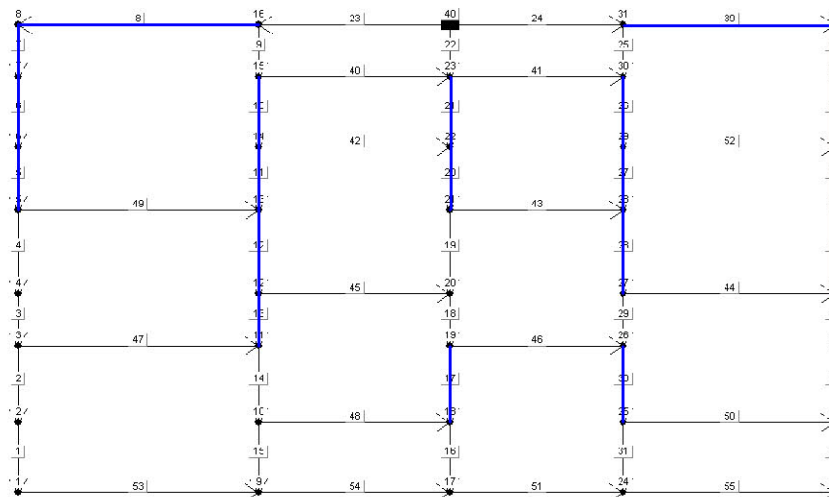


Figura 3-8 Ubicación de los tubos encontrados luego de 25 cambios realizados.

El plano de presiones encontrado es el siguiente, Figura 3-9. Los respectivos índices calculados se encuentran en la Tabla 3-9.

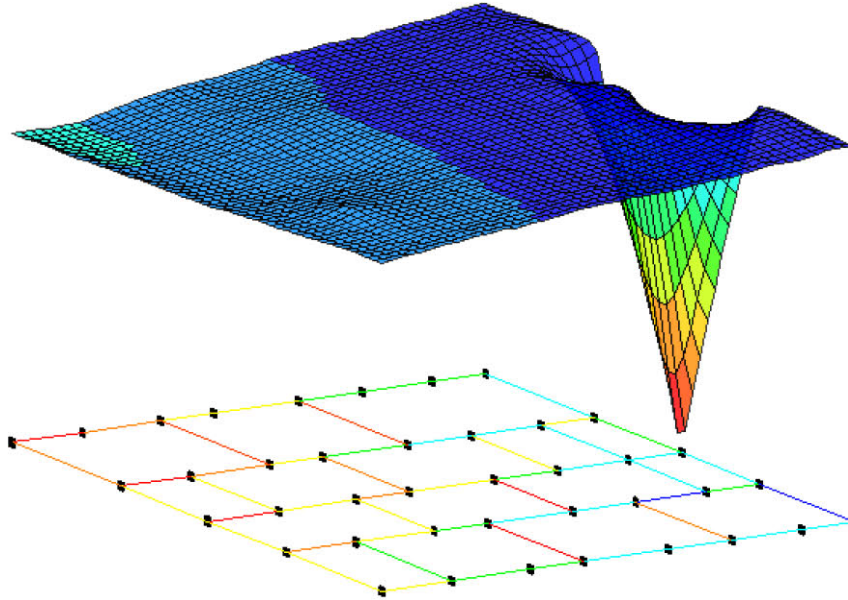


Figura 3-9 Plano de Presiones luego de 25 cambios realizados en la red ejemplo 1.

# CAMBIOS	I_r	CU	DESV (m)	TIEMPO DE VIAJE (seg)	VOLUMEN (m ³)	H_e	COSTO/1000 (\$)
25	0.91926	0.9678	0.9928	404.079	301.44	19.6721	584,466

Tabla 3-9 Resultados obtenidos luego de 25 cambios realizados en la red ejemplo 1.

- Punto óptimo:
Los cambios se realizaron en las tuberías mostradas en la Figura 3-10.

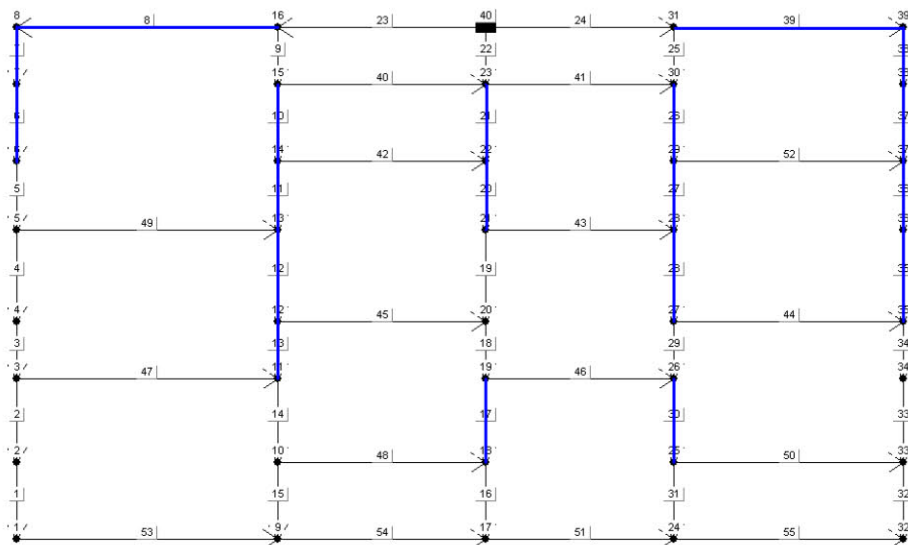


Figura 3-10 Ubicación de los tubos encontrados en el punto óptimo de rehabilitación.

El plano de presiones encontrado es el siguiente, Figura 3.12. Los respectivos índices calculados se encuentran en la Tabla 3-10.

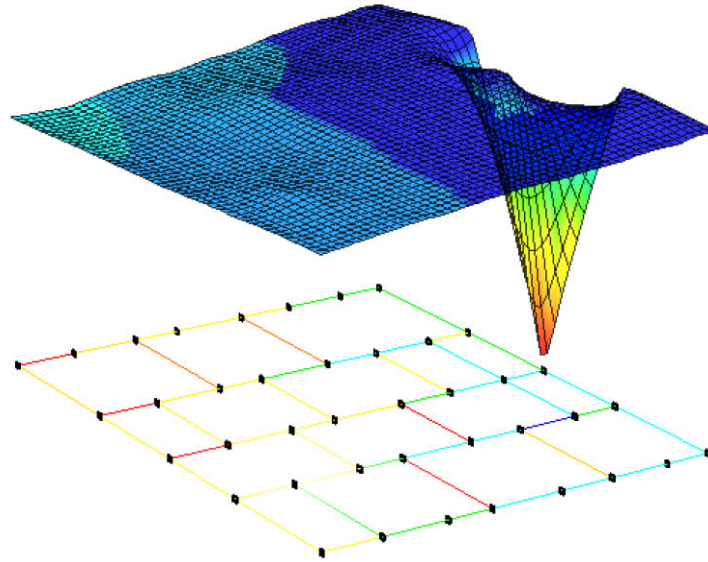


Figura 3-11 Plano de Presiones luego en el punto óptimo de rehabilitación de la red ejemplo 1.

# CAMBIOS	I_r	CU	DESV (m)	TIEMPO DE VIAJE (seg)	VOLUMEN (m ³)	H_o	COSTO/1000 (\$)
22	0.91483	0.9639	1.0576	388.061	289.421	20.0074	544,930

Tabla 3-10 Resultados obtenidos en el punto óptimo de rehabilitación de la red ejemplo 1.

El estado de presiones en el punto óptimo de rehabilitación se muestra en la Figura 3-12.

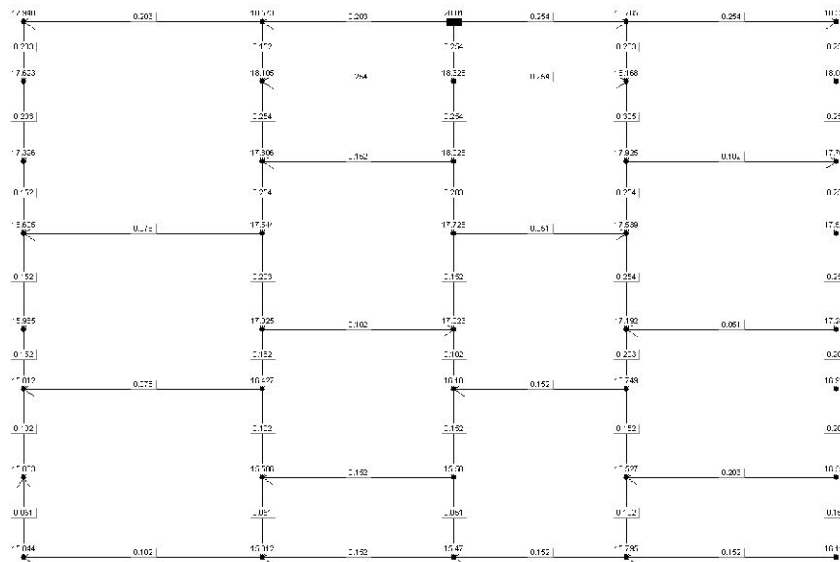


Figura 3-12 Estado de presiones en el punto óptimo de rehabilitación de la red del ejemplo 1.

Gráficamente se puede observar el comportamiento de los índices utilizados para analizar la red comparando cada uno con el costo de rehabilitación, Figura 3-13 Índice de Resiliencia, Figura 3-14 Coeficiente de Uniformidad, Figura 3-15 Desviación del estado de presiones, Figura 3-16 Tiempo ponderado de retención de agua en las tuberías y la Figura 3-17 Volumen en la red.

Igualmente se presenta la disminución gradual de la presión de entrada respecto al número de cambios realizados en la red, Figura 3-18, la relación existente entre el Coeficiente de Uniformidad y la Desviación del estado de presiones con el Índice de Resiliencia, Figura 3-19 y Figura 3-20 respectivamente.

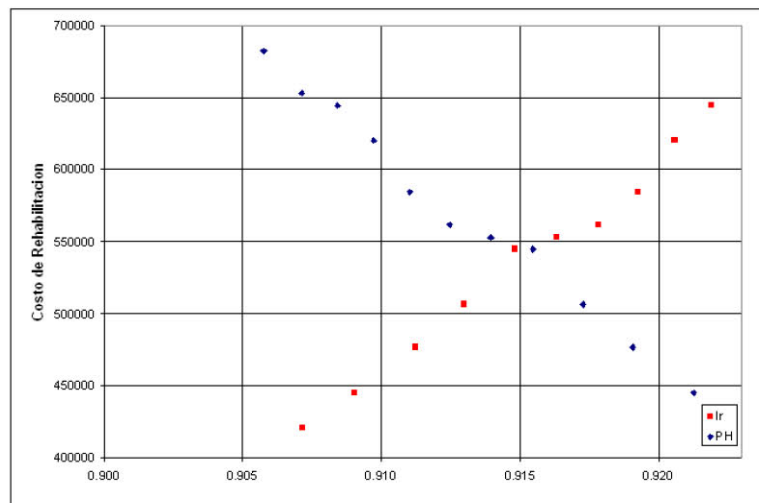


Figura 3-13 Relación entre el Costo de rehabilitación con el Índice de Resiliencia y el Perjuicio hidráulico.

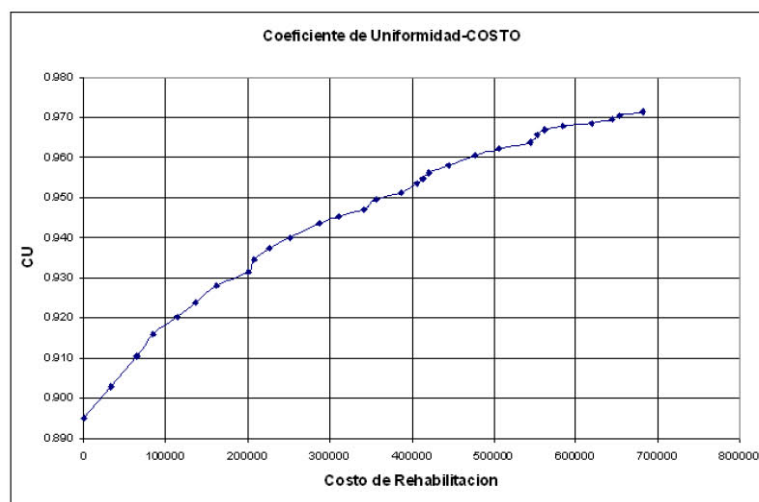


Figura 3-14 Relación entre el Costo de rehabilitación con el Coeficiente de Uniformidad.

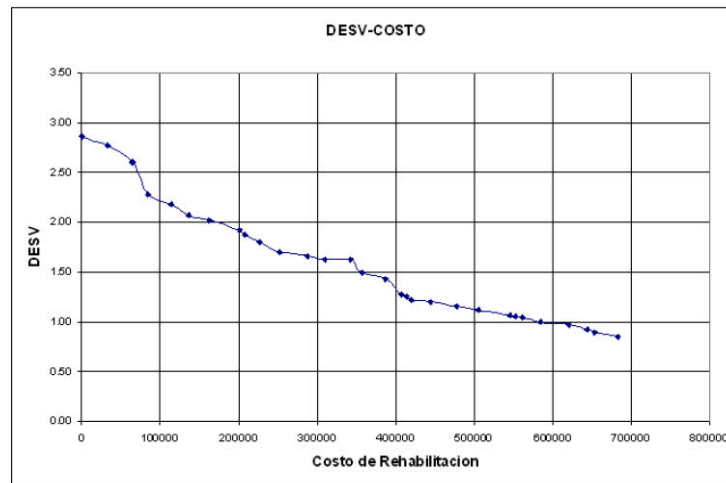


Figura 3-15 Relación entre el Costo de rehabilitación y la Desviación estándar del estado de presiones.

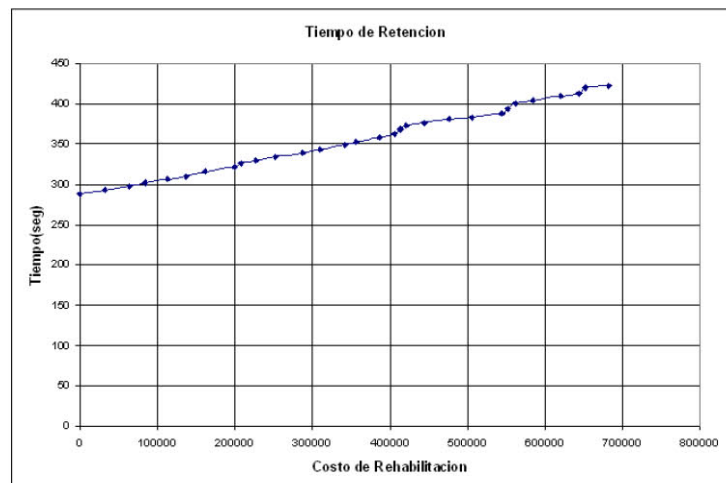


Figura 3-16 Relación entre el Costo de rehabilitación y el Tiempo Ponderado de Retención de agua en las tuberías.

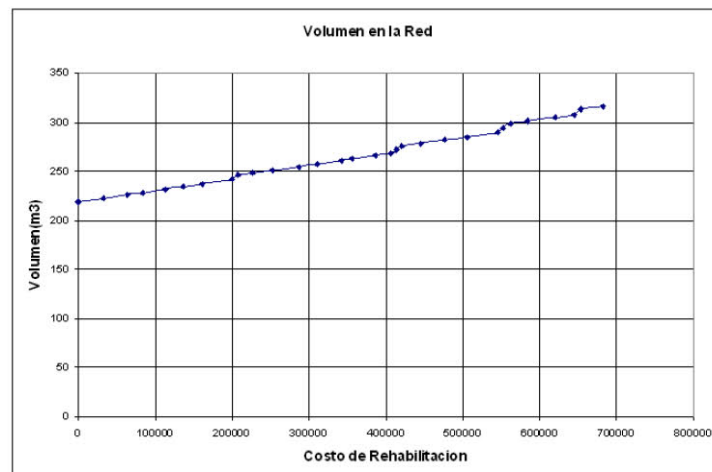


Figura 3-17 Relación entre el Costo de rehabilitación y el Volumen de agua en las tuberías.

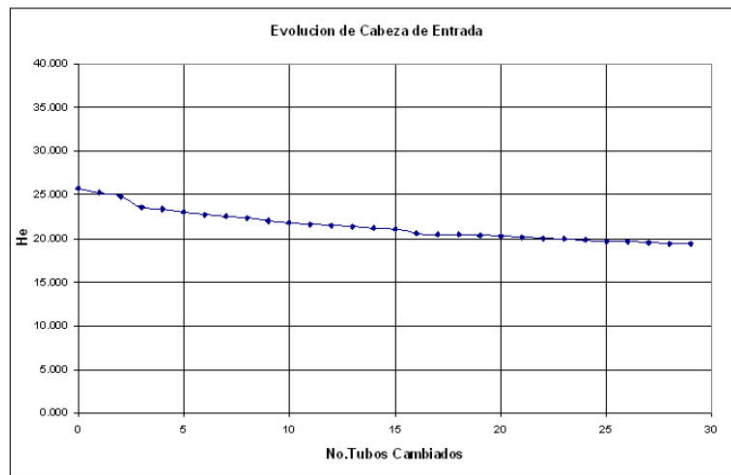


Figura 3-18 Relación entre el número de tuberías cambiadas y la disminución en la cabeza de entrada.

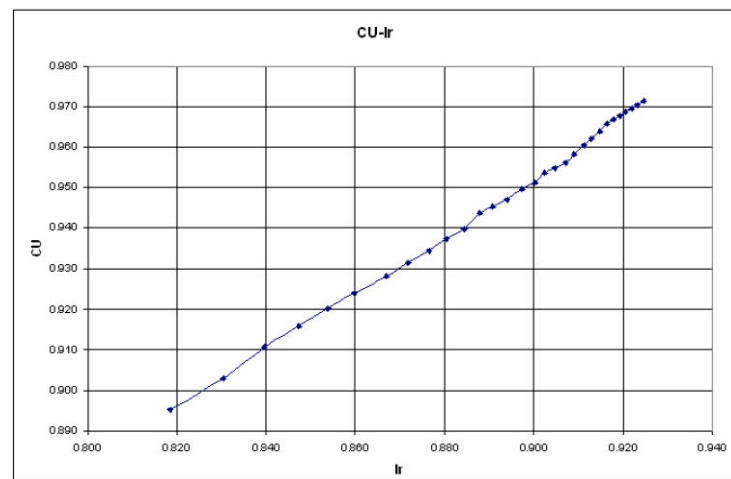


Figura 3-19 Relación entre el Coeficiente de Uniformidad y el Índice de Resiliencia.

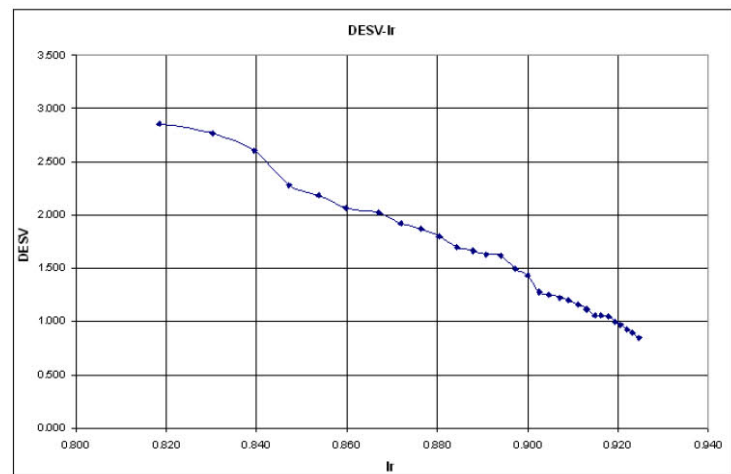


Figura 3-20 Relación entre la Desviación del estado de presiones y el Índice de Resiliencia.

3.2 Aplicación a la Red existente.

La red existente analizada en este proyecto corresponde al Sector 35 del sistema de distribución de agua potable de la ciudad de Bogotá D.C.; el cual se encuentra limitado al norte por la Calle 200, al sur por la Calle 170, al oriente por la Avenida 9 y al occidente por la Autopista Norte. La localización del Sector 35 se aprecia en la figura que aparece a continuación, Figura 3-21.

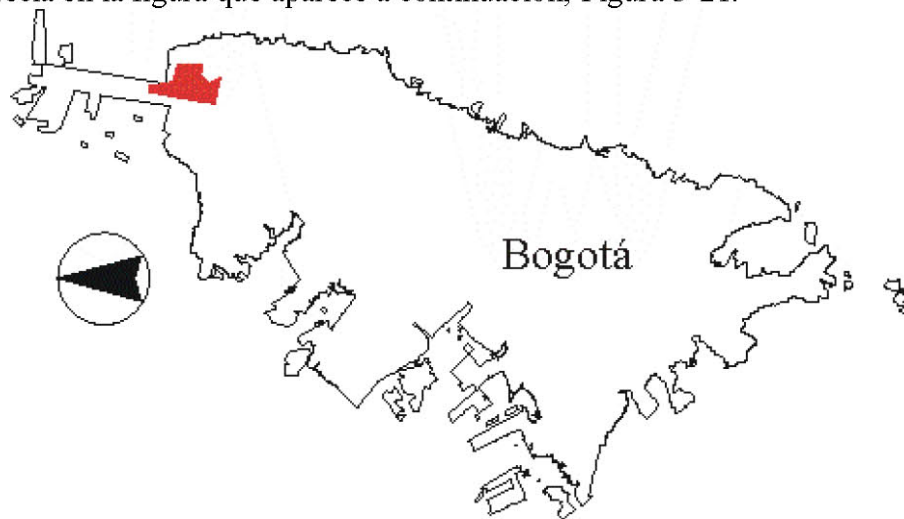


Figura 3-21 Ubicación del Sector 35 en la Ciudad de Bogotá D.C.

El sistema ésta compuesto por 1289 tuberías y 1190 nodos, con una longitud total de tubería de 39.37 kms. La fuente suministra inicialmente una presión de 47.77 M.C.A. al sistema de abastecimiento. El diámetro máximo permitido es de 457.2 mm (18”). La distribución de las tuberías se muestra en la Figura 3-22.

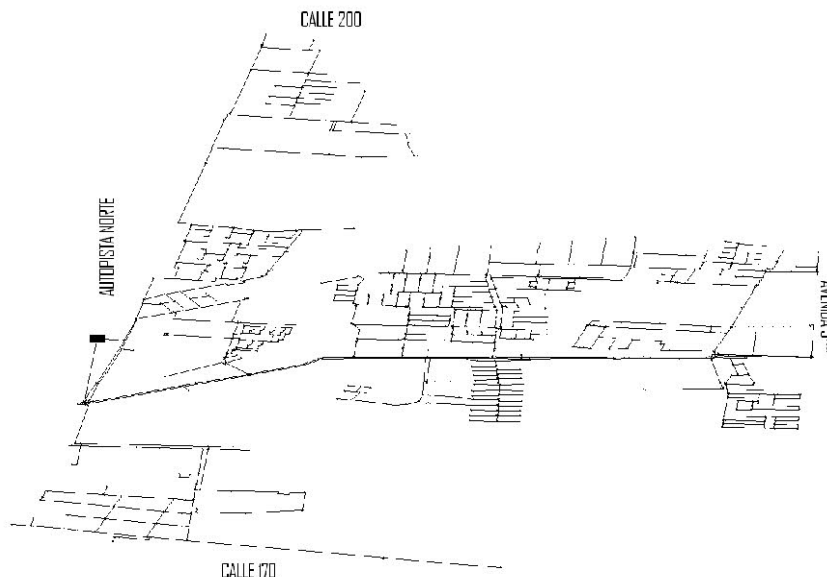


Figura 3-22 Distribución de tuberías en la red de distribución del Sector 35.

Los indicadores de comportamiento iniciales se presentan a continuación, Tabla 3-11.

# CAMBIOS	I _r	CU	DESV (m)	TIEMPO DE VIAJE (seg)	VOLUMEN (m ³)	H _o	COSTO/1000 (\$)
0	0.919500143	0.97094772	2.054	282.392	658.045	23.9411	-

Tabla 3-11 Indicadores de Comportamiento Iniciales para la red del sector 35.

La evolución del proceso de uniformización del estado de presiones de la red se muestra en la Tabla 3-12. Los resultados obtenidos durante la aplicación del soporte de decisión se encuentran en la Tabla 3-13, en la cual se muestra la disminución gradual en la cabeza de entrada que puede ser lograda.

# CAMBIOS	#TUBOS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
	TUBO	509	500	511	369	501	370	1289	541	372	379	47	1012	1014	35	377	41	1011	382	39	827	375	381	40
	%LONGITUD	263.64	213.78	18.92	238.66	12.89	115.01	375.80	234.61	105.06	163.97	170.42	37.06	36.22	16.70	47.63	144.41	40.43	73.68	97.38	88.18	30.40	52.03	60.41
1	0.67688	0.524																						
2	0.67688	0.2032																						
3	1.23248	0.2032	0.2032																					
4	1.26054	0.2032	0.2032	0.1524																				
5	1.88662	0.2032	0.2032	0.1524	0.3556																			
6	1.91936	0.2032	0.2032	0.1524	0.3556	0.1524																		
7	2.22168	0.2032	0.2032	0.1524	0.3556	0.1524	0.3556																	
8	2.22168	0.2032	0.2032	0.1524	0.4064	0.1524	0.3556																	
9	2.22160	0.254	0.2032	0.1524	0.4064	0.1524	0.3556																	
10	3.7594	0.254	0.2032	0.1524	0.4064	0.1524	0.3556	0.3556																
11	3.7594	0.254	0.254	0.1524	0.4064	0.1524	0.3556	0.3556																
12	3.77173	0.254	0.254	0.1524	0.4064	0.1524	0.3556	0.3556	0.1524															
13	3.77173	0.254	0.254	0.1524	0.4572	0.1524	0.3556	0.3556	0.1524															
14	3.77173	0.254	0.254	0.1524	0.4572	0.1524	0.4064	0.3556	0.1524															
15	3.77173	0.254	0.254	0.1524	0.4572	0.1524	0.4064	0.4064	0.1524															
16	4.03654	0.254	0.254	0.1524	0.4572	0.1524	0.4064	0.4064	0.1524	0.3556														
17	4.03654	0.254	0.254	0.1524	0.4572	0.1524	0.4064	0.4572	0.1524	0.3556														
18	4.03654	0.254	0.254	0.1524	0.4572	0.1524	0.4572	0.4572	0.1524	0.3556														
19	4.42604	0.254	0.254	0.1524	0.4572	0.1524	0.4572	0.4572	0.1524	0.3556	0.3556													
20	4.42604	0.254	0.254	0.1524	0.4572	0.1524	0.4572	0.4572	0.2032	0.3556	0.3556													
21	4.42604	0.254	0.254	0.2032	0.4572	0.1524	0.4572	0.4572	0.2032	0.3556	0.3556													
22	4.42604	0.3048	0.254	0.2032	0.4572	0.1524	0.4572	0.4572	0.2032	0.3556	0.3556													
23	4.86084	0.3048	0.254	0.2032	0.4572	0.1524	0.4572	0.4572	0.2032	0.3556	0.3556	0.254												
24	4.95496	0.3048	0.254	0.2032	0.4572	0.1524	0.4572	0.4572	0.2032	0.3556	0.3556	0.254	0.2032											
25	5.04694	0.3040	0.254	0.2032	0.4572	0.1524	0.4572	0.4572	0.2032	0.3556	0.3556	0.254	0.2032	0.2032										
26	5.08934	0.3048	0.254	0.2032	0.4572	0.1524	0.4572	0.4572	0.2032	0.3556	0.3556	0.254	0.2032	0.2032	0.3556									
27	5.21031	0.3048	0.254	0.2032	0.4572	0.1524	0.4572	0.4572	0.2032	0.3556	0.3556	0.254	0.2032	0.2032	0.3556	0.3556								
28	5.21031	0.3048	0.3048	0.2032	0.4572	0.1524	0.4572	0.4572	0.2032	0.3556	0.3556	0.254	0.2032	0.2032	0.3556	0.3556								
29	5.57704	0.3048	0.3048	0.2032	0.4572	0.1524	0.4572	0.4572	0.2032	0.3556	0.3556	0.254	0.2032	0.2032	0.3556	0.3556	0.254							
30	5.67971	0.3048	0.3048	0.2032	0.4572	0.1524	0.4572	0.4572	0.2032	0.3556	0.3556	0.254	0.2032	0.2032	0.3556	0.3556	0.254	0.2032						
31	5.67971	0.3048	0.3048	0.2032	0.4572	0.1524	0.4572	0.4572	0.2032	0.4064	0.3556	0.254	0.2032	0.2032	0.3556	0.3556	0.254	0.2032						
32	5.67971	0.3048	0.3048	0.2032	0.4572	0.2032	0.4572	0.4572	0.2032	0.4064	0.3556	0.254	0.2032	0.2032	0.3556	0.3556	0.254	0.2032						
33	5.86657	0.3048	0.3048	0.2032	0.4572	0.2032	0.4572	0.4572	0.2032	0.4064	0.3556	0.254	0.2032	0.2032	0.3556	0.3556	0.254	0.2032	0.3556					
34	5.86657	0.3048	0.3048	0.2032	0.4572	0.2032	0.4572	0.4572	0.2032	0.4064	0.4064	0.254	0.2032	0.2032	0.3556	0.3556	0.254	0.2032	0.3556					
35	6.1398	0.3048	0.3048	0.2032	0.4572	0.2032	0.4572	0.4572	0.2032	0.4064	0.4064	0.254	0.2032	0.2032	0.3556	0.3556	0.254	0.2032	0.3556	0.254				
36	6.33793	0.3048	0.3048	0.2032	0.4572	0.2032	0.4572	0.4572	0.2032	0.4064	0.4064	0.254	0.2032	0.2032	0.3556	0.3556	0.254	0.2032	0.3556	0.254	0.2032			
37	6.41504	0.3048	0.3048	0.2032	0.4572	0.2032	0.4572	0.4572	0.2032	0.4064	0.4064	0.254	0.2032	0.2032	0.3556	0.3556	0.254	0.2032	0.3556	0.254	0.2032	0.3556		
38	6.54716	0.3048	0.3048	0.2032	0.4572	0.2032	0.4572	0.4572	0.2032	0.4064	0.4064	0.254	0.2032	0.2032	0.3556	0.3556	0.254	0.2032	0.3556	0.254	0.2032	0.3556	0.3556	
39	6.70758	0.3048	0.3048	0.2032	0.4572	0.2032	0.4572	0.4572	0.2032	0.4064	0.4064	0.254	0.2032	0.2032	0.3556	0.3556	0.254	0.2032	0.3556	0.254	0.2032	0.3556	0.3556	0.254

Tabla 3-12 Evolución del proceso de uniformización del estado de presiones de la red del Sector 35

# CAMBIOS	I _c	PH	CU	DESV (m)	TIEMPO DE VIAJE (seg)	VOLUMEN (m ³)	H _c	COSTO/1000 (\$)
0	0.9195		0.9709	2.0540	282.392	658.045	23.941	0
1	0.9565		0.9788	0.7474	282.441	660.746	18.521	24.541
2	0.9611	0.9954	0.9797	0.6070	284.234	664.528	17.852	33.714
3	0.9648	0.9917	0.9806	0.5033	285.584	667.632	17.301	61.386
4	0.9678	0.9887	0.9812	0.4379	285.677	667.824	16.969	63.129
5	0.9703	0.9862	0.9829	0.4113	289.492	674.112	16.788	119.117
6	0.9721	0.9844	0.9833	0.3780	289.448	674.243	16.526	120.303
7	0.9736	0.9829	0.9842	0.3628	291.598	677.378	16.484	148.221
8	0.9749	0.9816	0.9851	0.3487	295.517	684.634	16.443	157.113
9	0.9760	0.9806	0.9854	0.3326	298.435	689.496	16.296	166.528
10	0.9769	0.9796	0.9860	0.3287	310.640	699.398	16.265	254.688
11	0.9778	0.9787	0.9862	0.3179	315.000	703.389	16.144	262.417
12	0.9786	0.9779	0.9864	0.3071	313.635	705.767	16.084	284.018
13	0.9793	0.9772	0.9869	0.2988	319.931	713.990	16.053	293.026
14	0.9801	0.9764	0.9874	0.2904	322.087	717.608	16.020	297.460
15	0.9808	0.9757	0.9879	0.2877	334.323	729.033	15.995	311.460
16	0.9813	0.9752	0.9883	0.2780	335.460	731.801	15.967	336.107
17	0.9818	0.9747	0.9886	0.2766	347.817	744.750	15.950	350.291
18	0.9822	0.9743	0.9889	0.2722	350.020	748.850	15.932	354.782
19	0.9826	0.9739	0.9892	0.2638	351.763	752.892	15.908	390.762
20	0.9830	0.9735	0.9893	0.2591	352.650	756.220	15.908	398.836
21	0.9833	0.9732	0.9894	0.2565	353.622	756.489	15.908	399.487
22	0.9837	0.9728	0.9894	0.2548	355.811	762.431	15.908	409.101
23	0.9839	0.9726	0.9896	0.2533	358.824	765.540	15.904	436.679
24	0.9842	0.9723	0.9898	0.2404	359.254	766.066	15.856	441.366
25	0.9845	0.9720	0.9900	0.2282	358.879	766.580	15.824	445.948
26	0.9847	0.9718	0.9902	0.2253	359.577	767.020	15.813	449.865
27	0.9850	0.9715	0.9904	0.2200	360.153	768.275	15.798	461.039
28	0.9853	0.9712	0.9904	0.2188	361.688	773.152	15.798	468.931
29	0.9855	0.9710	0.9905	0.2170	363.830	775.787	15.794	492.298
30	0.9858	0.9707	0.9907	0.2068	364.402	776.360	15.794	497.412
31	0.9860	0.9705	0.9909	0.2017	366.534	779.554	15.780	501.326
32	0.9862	0.9703	0.9910	0.2009	366.556	779.737	15.780	501.770
33	0.9864	0.9701	0.9911	0.1956	367.466	781.676	15.765	519.031
34	0.9866	0.9699	0.9913	0.1906	368.881	786.339	15.750	524.745
35	0.9868	0.9697	0.9914	0.1891	371.224	788.115	15.746	540.503
36	0.9870	0.9695	0.9915	0.1875	371.455	789.366	15.746	551.657
37	0.9872	0.9693	0.9916	0.1841	371.059	790.167	15.737	558.789
38	0.9873	0.9692	0.9917	0.1802	372.554	791.538	15.725	570.995
39	0.9875	0.9690	0.9918	0.1791	373.606	792.640	15.722	580.770

Tabla 3-13 Resultados obtenidos durante la aplicación del soporte de decisión

El plano inicial de presiones se muestra en la Figura 3-23. De la misma manera se presenta una secuencia del proceso de optimización con el fin de uniformizar el estado de presiones en la red del Sector 35, la cual sigue el número de cambios realizados sobre la misma. Los correspondientes diámetros cambiados se muestran en la Tabla 3-12.

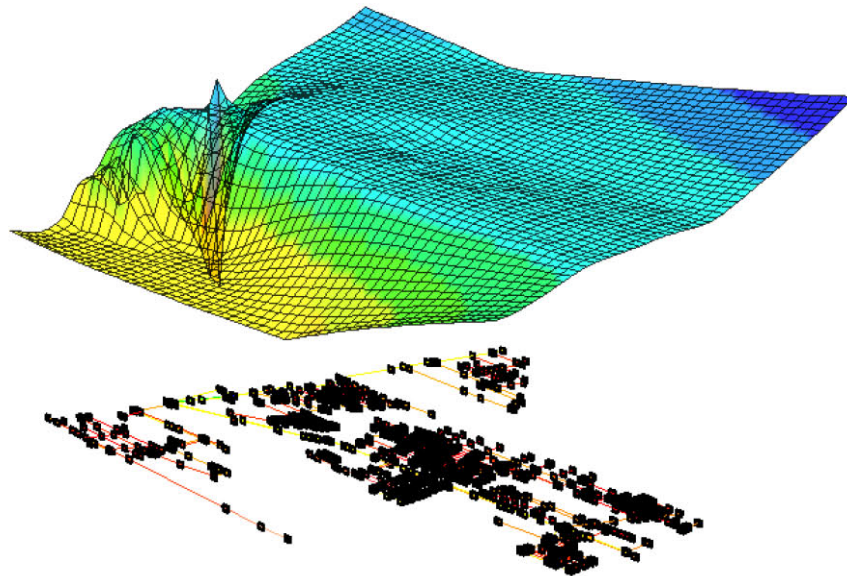


Figura 3-23 Plano inicial de presiones

- 2 Cambios:

El plano de presiones encontrado luego de realizar los cambios es el siguiente, Figura 3-24. Los índices de comportamiento se presentan en la Tabla 3-14.

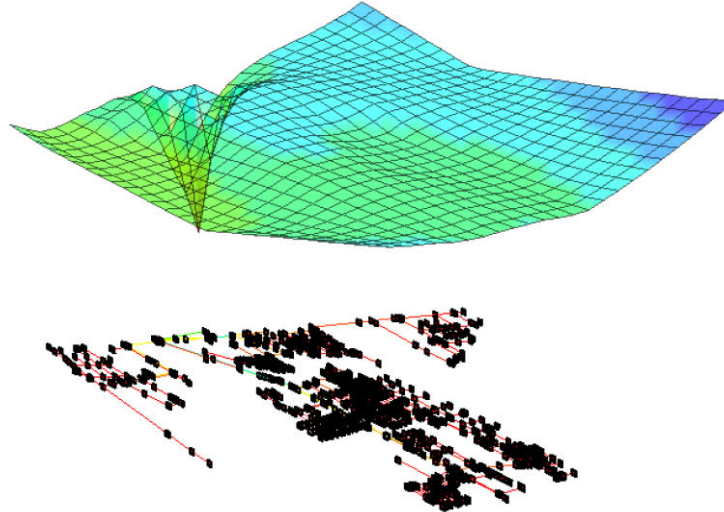


Figura 3-24 Plano de presiones encontrado luego de realizar 2 cambios.

# CAMBIOS	I_r	CU	DESV (m)	TIEMPO DE VIAJE (seg)	VOLUMEN (m ³)	H_e	COSTO/1000 (\$)
2	0.96107	0.97974	0.60699	284.234	664.53	17.852	33,714

Tabla 3-14 Índices de Comportamiento luego de realizar 2 cambios en la red.

- 5 cambios:

El plano de presiones encontrado luego de realizar los cambios es el siguiente, Figura 3-25. Los índices de comportamiento se presentan en la Tabla 3-15.

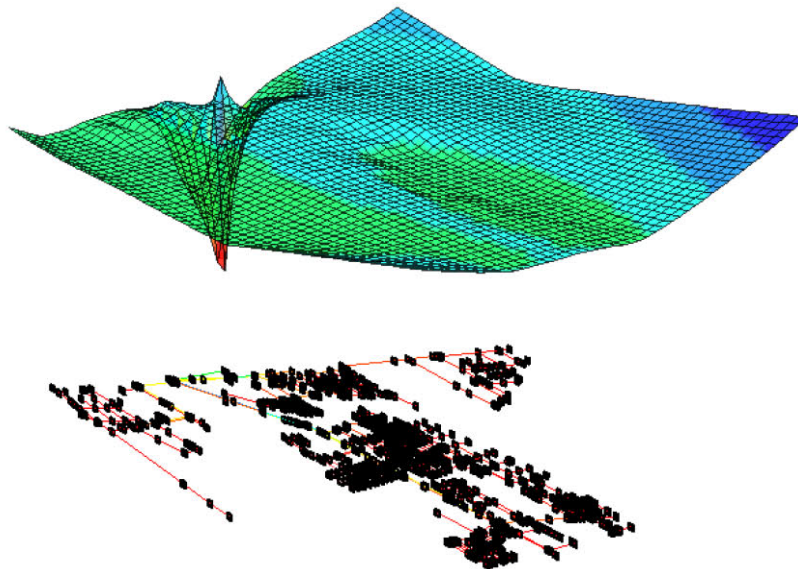


Figura 3-25 Plano de presiones encontrado luego de realizar 5 cambios.

# CAMBIOS	I_r	CU	DESV (m)	TIEMPO DE VIAJE (seg)	VOLUMEN (m ³)	H ₀	COSTO/1000 (\$)
5	0.97035	0.98288	0.41125	289.492	674.11	16.788	119,117

Tabla 3-15 Índices de Comportamiento luego de realizar 5 cambios en la red.

- 15 cambios:

El plano de presiones encontrado luego de realizar los cambios es el siguiente, Figura 3-26. Los índices de comportamiento se presentan en la Tabla 3-16.

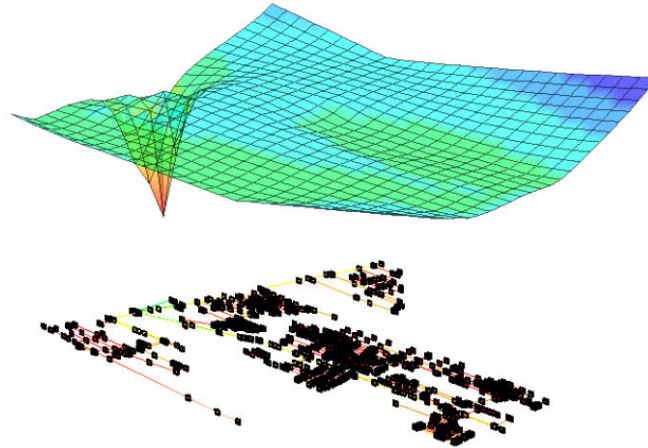


Figura 3-26 Plano de presiones encontrado luego de realizar 15 cambios.

# CAMBIOS	I_r	CU	DESV (m)	TIEMPO DE VIAJE (seg)	VOLUMEN (m ³)	H ₀	COSTO/1000 (\$)
15	0.98083	0.9879	0.28768	334.323	729.03	15.995	311,460

Tabla 3-16 Índices de Comportamiento luego de realizar 15 cambios en la red.

- Punto óptimo:

El plano de presiones encontrado para el punto óptimo de rehabilitación es el siguiente, Figura 3-27. Los índices de comportamiento se presentan en la Tabla 3-17.

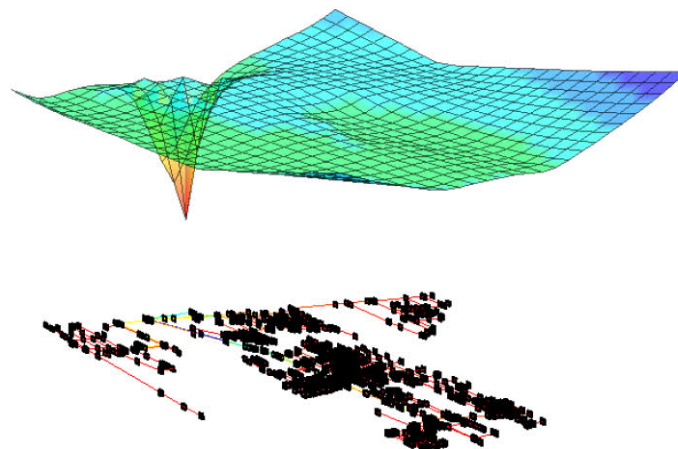


Figura 3-27 Plano de presiones para el punto óptimo de rehabilitación.

# CAMBIOS	I_r	CU	DESV (m)	TIEMPO DE VIAJE (seg)	VOLUMEN (m ³)	H_0	COSTO/1000 (\$)
11	0.97777	0.98619	0.31789	315	703.39	16.144	262,417

Tabla 3-17 Índices de Comportamiento para el punto óptimo de rehabilitación.

El comportamiento de los índices utilizados para analizar la red comparando cada uno con el Costo de rehabilitación se presentan en las Figuras 3.30, 3.31, 3.32, 3.33, 3.34. La disminución gradual de la presión de entrada respecto al número de cambios realizados en la red, Figura 3.35, la relación existente entre el Coeficiente de Uniformidad y la Desviación estándar del estado de presiones con el Índice de Resiliencia, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** respectivamente.

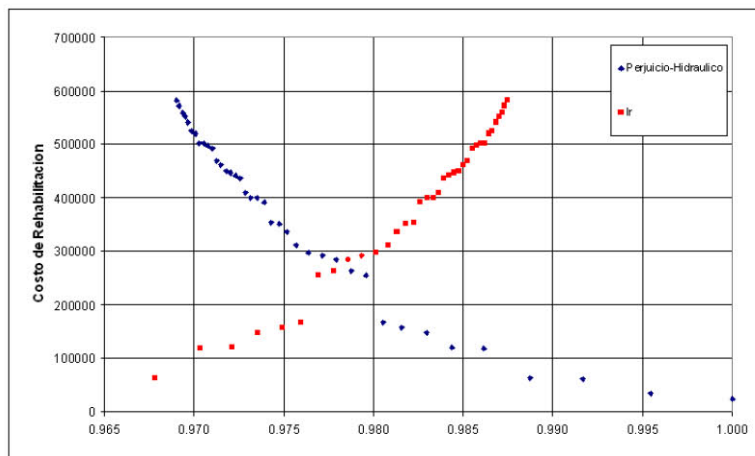


Figura 3-28 Relación entre el Costo de rehabilitación con el Índice de Resiliencia y el Perjuicio hidráulico.

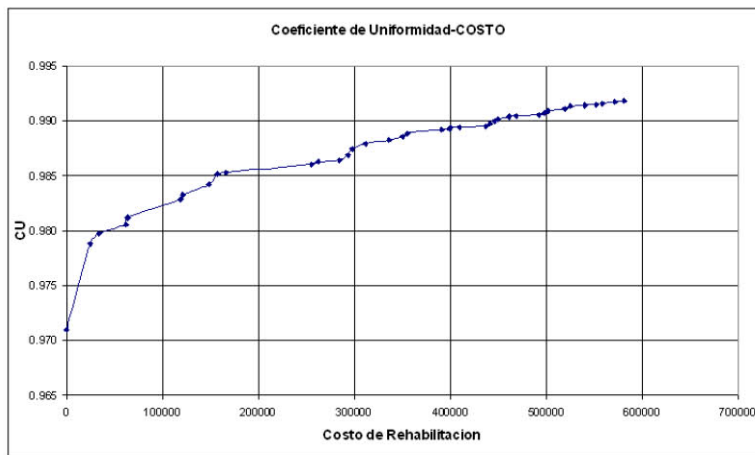


Figura 3-29 Relación entre el Costo de rehabilitación con el Coeficiente de Uniformidad.

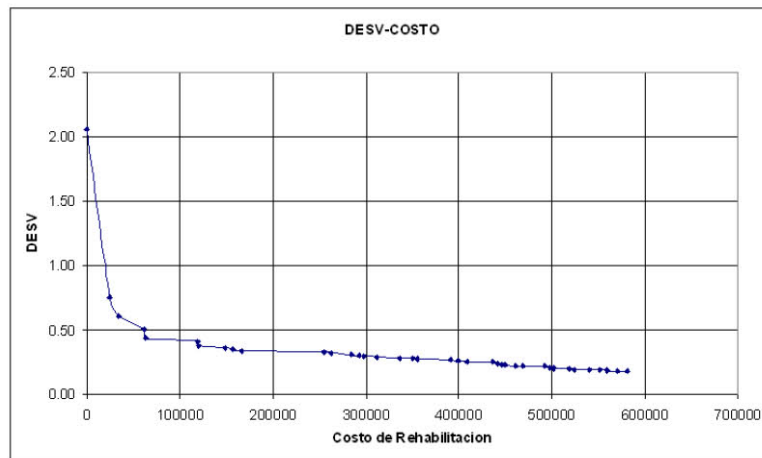


Figura 3-30 Relación entre el Costo de rehabilitación con la Desviación del estado de presiones.

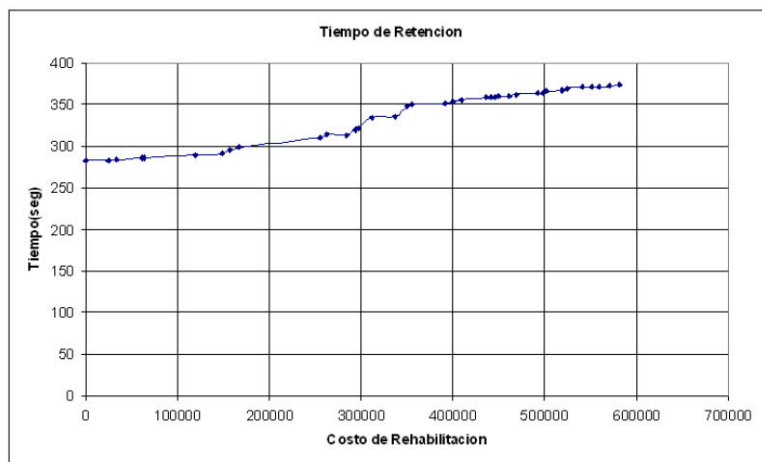


Figura 3-31 Relación entre el Costo de rehabilitación con el Tiempo ponderado de viaje del agua en las tuberías.

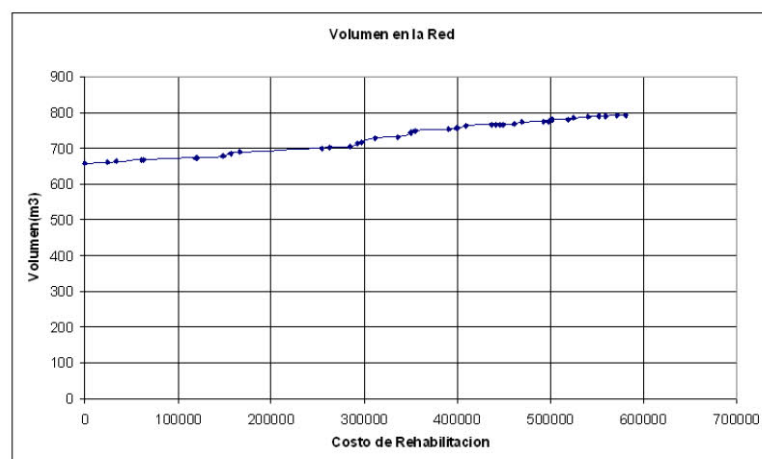


Figura 3-32 Relación entre el Costo de rehabilitación con el Volumen de agua en la red.

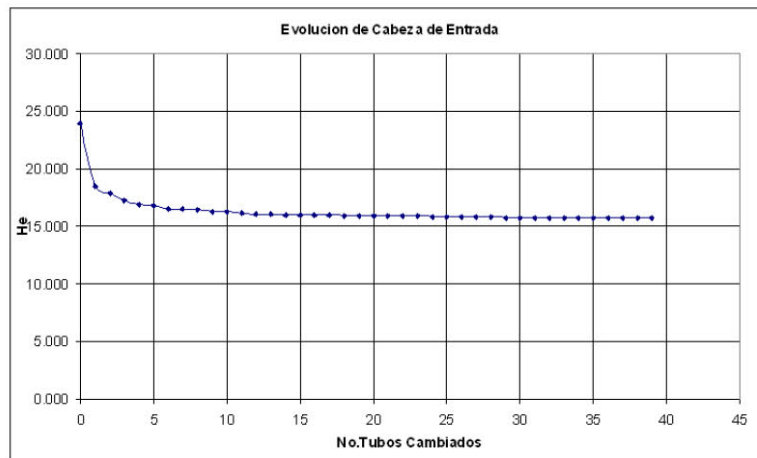


Figura 3-33 Relación entre el número de cambios y la disminución en la cabeza de entrada.

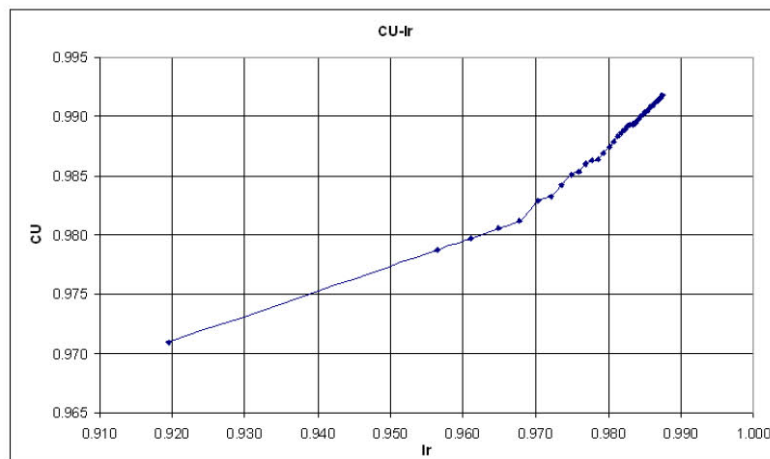


Figura 3-34 Relación entre el Coeficiente de Uniformidad y el Índice de Resiliencia.

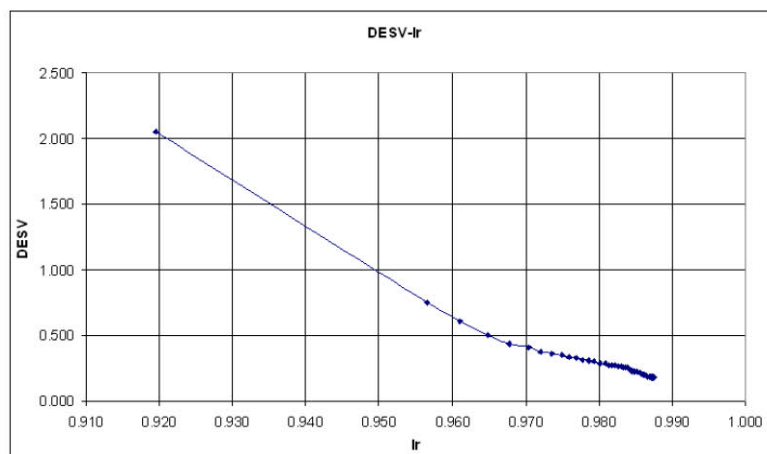


Figura 3-35 Relación entre la Desviación del estado de presiones en la red y el Índice de Resiliencia.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Influencia de las variables sobre el desarrollo del algoritmo.

Como se ha podido observar la uniformidad del estado de presiones en una red de distribución es función de la energía disponible para disipar, incorporada en el Índice de Resiliencia. Debido a que a medida que se maximiza este índice, se logra uniformizar las presiones en los nodos de consumo.

El Índice de Resiliencia y el Coeficiente de Uniformidad tienen un comportamiento asintótico, es decir que a medida que se logra conservar la energía en toda la red, se va encontrando un límite en éstos índices después del cual las modificaciones que se realicen a la red no mejoran significativamente la confiabilidad de la misma.

En general, es posible observar que la Desviación Estándar del estado de presiones en los nodos de consumo de una red de distribución de agua potable va disminuyendo de manera lineal con el aumento del Índice de Resiliencia. Por otra parte el Coeficiente de Uniformidad aumenta de forma lineal con el correspondiente aumento en el Índice de Resiliencia.

A partir del comportamiento asintótico del Índice de Resiliencia es posible encontrar el punto óptimo de rehabilitación. Este se encuentra al graficar al mismo tiempo el Perjuicio Hidráulico para cada una de las configuraciones encontradas, y posteriormente sumar estas dos curvas para ubicar el punto mínimo de la curva resultante. Este último corresponde al Índice de Resiliencia óptimo del proceso de rehabilitación.

Particularmente, para el estudio de la red existente del Sector 35 del sistema de distribución de agua de Bogotá D.C., se confirma la efectividad de la metodología aplicada, debido a que con sólo 23 tubos cambiados, el equivalente al 6.7% de la longitud total del sistema de tuberías, se logra disminuir la Desviación Estándar del estado de presiones en un 91.27%.

Al mismo tiempo de desarrollar el procedimiento, se analizó de forma cualitativa el comportamiento del estado de presiones en los nodos y se encontró que la metodología logra uniformizar de forma parcial el estado de presiones. Esto es que la tubería considerada y escogida para ser modificada, luego de cambiar su configuración uniformiza cierto sub-sector de presiones en la red. Lo anterior se ve claramente en el caso de la red del Sector 35, en la cual las tuberías encontradas no son tuberías aleatorias, sino por el contrario, se encuentran “líneas expresas” de tuberías, Tabla 4-1.

Por otra parte, el efecto que tiene la metodología sobre el Tiempo de retención de agua en las tuberías de la red de distribución y el Volumen en la misma no es significativo. Aunque ocurre el esperado aumento de los mismos, debido al aumento en los diámetros de las tuberías con el fin de disminuir las pérdidas por fricción en las tuberías, esta alteración es mínima para efectos no sólo de calidad de agua sino por razones de economía del recurso.

6 RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- En el presente trabajo se encontró una metodología para mejorar el nivel de confiabilidad hidráulica del sistema desde el punto de vista de uniformidad de presiones; sin embargo se debe tener en cuenta el efecto real sobre la presencia de fugas. La modelación de la presencia de fugas se realizó de manera uniforme sobre toda la red, encontrándose las mismas configuraciones de tuberías rehabilitadas. Lo que se plantea con esto es la modelación futura del nivel de fugas a través del desarrollo de algún tipo de metodología estocástica, es decir que para encontrar el punto óptimo real de rehabilitación se debe comparar la curva de Índice de Resiliencia con una curva derivada del efecto de la uniformización del estado de presiones sobre la presencia de fugas en el sistema.
- Por otro lado, la rehabilitación de redes de distribución no sólo debe centrarse en el estado de presiones de consumo en toda la red. El concepto de rehabilitación de redes de distribución es mucho más amplio, el cual abarca todas las estaciones presentadas en la Figura 2-1.
- En el presente trabajo se desarrolló, para el problema particular de uniformidad de presiones, las tres primeras estaciones. Por lo tanto se deja abierta la posibilidad de desarrollar una metodología análoga a la implementada por la Unión Europea, mediante CARE-W con el desarrollo de UtilNets, involucrando simultáneamente los módulos de confiabilidad estructural, hidráulica, optimización de costos, calidad de agua, confiabilidad del servicio y el efecto futuro de la rehabilitación. En éste último se debe tener en cuenta la edad de las tuberías y aspectos de demanda futura que pueda presentarse en la red.