

# Rehabilitación Priorizada de Redes de Distribución Utilizando Potencia Disipada

## Saldarriaga, Juan

Ingeniero Civil, MSc.

Profesor Titular Universidad de los Andes, Director del Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA). E-mail: jsaldarr@uniandes.edu.co.

## Romero, Natalia

Ingeniera Civil

Investigadora Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA). E-mail: n.romero32@egresados.uniandes.edu.co.

## Ochoa, Susana

Ingeniera Civil

Investigadora Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA). E-mail: s.ochoa24@uniandes.edu.co.

## XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología

### Sociedad Colombiana de Ingenieros

Bogotá D.C. 22, 23, y 24 de mayo de 2008

**Resumen.** La operación de redes de distribución de agua potable involucra dos asuntos que tienen grandes repercusiones económicas: la rehabilitación de tuberías y la reducción del índice de agua no contabilizada (IANC). Este trabajo presenta un algoritmo que, con base en el concepto de potencia unitaria, permite seleccionar los tubos que deben ser rehabilitados con el fin de reducir la disipación de potencia y el IANC de la red, manteniendo el plano de presiones nivelado y encontrando la situación ideal para realizar la rehabilitación en términos de beneficios económicos. El artículo incluye el análisis de tres redes de distribución con características diferentes en las cuales la metodología propuesta probó contribuir hidráulicamente y logró establecer posibilidades de rehabilitación que resultaran rentables.

**Palabras clave.** Potencia disipada, potencia unitaria, redes de distribución, rehabilitación.

## 1. Introducción

La Gestión de Redes de Agua Potable busca nuevos métodos que permitan conocer el estado de las tuberías, facilitando priorizar la inversión en mantenimiento preventivo, rehabilitación y reemplazo de los elementos que componen los sistemas de distribución de agua potable. Actualmente existen investigaciones enfocadas en la determinación de la inversión óptima, las cuales diferencian entre los beneficios de rehabilitar o reemplazar las tuberías que lo requieran. Muchas de las metodologías propuestas tienen un fundamento principalmente económico y la manera de evaluar la necesidad de mantenimiento de una tubería se encuentra en función de la estimación de la tasa o probabilidad de daño.

El Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA) desarrolla y aplica metodologías que permiten conocer y proponer condiciones óptimas de funcionamiento hidráulico de las redes de distribución de agua. Entre éstas se destaca la metodología del Plano Óptimo de Presiones – POP – (Saldarriaga et al., 2006). Esta metodología permite conocer con cierta precisión las condiciones de la red - caudales y presiones en los diferentes nodos y tubos - para diferentes regímenes de operación. Igualmente, permite estimar el Índice de Agua No Contabilizada (IANC), el cual representa la diferencia entre el agua que entra al sistema de distribución y el agua que se registra como entregada a los consumidores del servicio. Recientes estudios han demostrado que también es posible localizar y diferenciar las pérdidas comerciales y técnicas (Jurado & Saldarriaga, 2007).

El IANC de municipios pequeños y medianos de Colombia se encuentra entre el 30 % y 60 % y para ciudades principales este índice se encuentra alrededor del 32 %. En el documento *The Challenge of Reducing Non-Revenue Water (NRW) in Developing Countries*, el IANC se estima alrededor de 35 % para países en desarrollo, 30 % para Eurasia y 15 % para países desarrollados. Sin embargo, se destaca el comentario de los autores con respecto al carácter conservador de las cifras, especialmente las de países en desarrollo, las cuales, en su opinión, deben estar más cercanas al 50 % (Kingdom et al., 2006).

Las pérdidas de agua están se clasifican en: pérdidas físicas, que corresponden al agua que se escapa por orificios en la tubería o fugas, y pérdidas comerciales, que se asocian a fallas técnicas en los micromedidores y a conexiones desconocidas por la empresa que suministra el servicio. Las pérdidas físicas son normalmente tratadas con el control de presiones en la red.

Colombo & Karney (2002) determinan que las fugas son costosas por la pérdida en agua y químicos de tratamiento, por el riesgo del deterioro del agua potable debido su contaminación al entrar en contacto con agentes en el exterior de la tubería, por el crecimiento innecesario de la capacidad del sistema y por la energía adicional requerida para suplir las fugas. Por este motivo, es de vital importancia invertir en metodologías de rehabilitación de redes que se enfoquen en disminuir el IANC, generando una rentabilidad aceptable y mejorando otras características de la red, tales como su eficiencia energética y su vulnerabilidad ante fallas en el sistema. Bajo este panorama, en este artículo se propone una metodología que facilita la priorización de tubos a reemplazar y propone un punto óptimo de inversión en mantenimiento preventivo de redes de acueducto. La metodología propuesta es aplicada a redes teóricas de circuitos cerrados y a redes reales con condiciones de topografía variable, buscando disminuir el porcentaje de Agua No Contabilizada y

las pérdidas internas en la red a través de la uniformización de presiones y reducción generalizada del rango de presiones de operación de la misma.

## 2. Definiciones

### 2.1. $P_{UTI}$ – Potencia Unitaria del Tubo $i$

La  $P_{UTI}$  se define como el caudal que pasa por el tubo  $i$  multiplicado por la diferencia entre las alturas piezométricas entre el nodo inicial y el nodo final del tubo. Cabe anotar que la designación de los nodos se hace considerando el sentido del flujo.

$$P_{UTI} = q_i (h_{i,ini}^* - h_{i,fin}^*) \quad [1]$$

### 2.2. $I_r$ – Índice de Resiliencia

El  $I_r$  es un indicador de la vulnerabilidad de la red frente a la posibilidad de dejar ciertos nodos del sistema sin servicio en caso de ocurrir una falla. Se fundamenta en la relación existente entre la resiliencia de un sistema y la cantidad de energía que éste disipa. A menor energía disipada, mayor será la capacidad de respuesta del mismo debido a la cantidad de energía disponible.

Para determinar el  $I_r$  se deben tener en cuenta las fugas en el sistema. En la siguiente ecuación se presenta la potencia de salida con fugas, la cual incluye el caudal asociado al emisor  $q_{f,i}$  (la forma de representar las fugas es mediante emisores). El emisor se modela mediante una relación potencial de la presión en el nodo:  $q_{f,i} = C_f h_i^{x_f}$ . Finalmente, la ecuación utilizada para calcular el  $I_r$  es la siguiente.

$$I_r = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} (q_i + q_{f,i}) (h_i - h_{i,obj})}{\sum_{i=1}^{n_e} Q_i H_i^* - \sum_{i=1}^{n_n} (q_i + q_{f,i}) h_{i,obj}^*} \quad [2]$$

donde  $Q_i$  y  $H_i^*$  corresponden al caudal y a la línea de gradiente hidráulico de cada uno de los  $n_e$  embalse de la red ( $n_e$  = número de embalses en la red),  $q_i$  y  $h_i^*$  corresponden al caudal y a la línea de gradiente hidráulico en cada uno de los  $n_n$  nodos de consumo de la red, y  $h_{i,obj}^*$  es la línea de gradiente hidráulico mínima requerida (en el caso de Colombia,  $h_{i,obj}^*$  es 15 m.c.a., sumado a la cota del nodo  $i$ ).

### 2.3. $P_{PC}$ – Porcentaje de Potencia Consumida

El  $P_{PC}$  mide la evolución de la eficiencia de la red en términos de consumo de energía. Se puede relacionar con la diferencia entre la energía suministrada,  $E_d$ , y la energía en la fuente del sistema,  $E_s$ , analizada por Colombo & Karney (Colombo & Karney, 2002). El  $P_{PC}$  se calcula de la siguiente forma:

$$P_{PC} = \frac{\gamma \sum_{i=1}^{n_n} (q_i + q_{f,i}) (h_i^* - z_{\min})}{\gamma \sum_{i=1}^{n_e} Q_i (H_i^* - z_{\min})} \% \quad [3]$$

En esta ecuación; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**,  $Z_{min}$  corresponde a la cota inferior de todos los nodos de la red. Este indicador muestra cuánta de la energía total de la red es usada para suplir el servicio. Por consiguiente, se espera que la metodología genere un incremento en el valor de dicho indicador para cada red.

#### 2.4. IANC – Índice de Agua No Contabilizada

El IANC estima el porcentaje de agua que se pierde en fugas o que no se encuentra registrado por la micromedición de un sistema de agua potable. El IANC se calcula mediante la siguiente ecuación, en la cual  $A_p$  es el volumen de agua producido por unidad de tiempo, en este caso, el que sale de los embalses del sistema, y  $A_f$  es el volumen de agua facturado por unidad de tiempo.

$$IANC = \frac{A_p - A_f}{A_p} \% \quad [4]$$

#### 2.5. $C_r$ – Costo de rehabilitación por metro de tubo $i$

El costo de rehabilitación por metro lineal de tubería puede estimarse mediante la siguiente función de costo, la cual fue desarrollada por el CIACUA para redes colombianas.

$$C_{ri} = 0,6306 \cdot D_i^{0,8946} \quad [5]$$

En esta ecuación,  $D_i$  es el diámetro de la tubería  $i$  en mm y  $C_{ri}$  es el costo en dólares de la tubería  $i$ . Esta ecuación se estableció con base en el costo de una zanja de 1,20 m de profundidad y 0,80 m de ancho, incluyendo los costos unitarios de tuberías, accesorios e instalación.

#### 2.6. $r$ – Rentabilidad

Para hacer un análisis apropiado de rentabilidad del proyecto es indispensable determinar el período de amortización de la inversión, el cual corresponde a la vida útil de la tubería. En este caso se toma como el tiempo que puede durar una tubería sin fugas desde su instalación, el cual depende de la calidad de los materiales, el entorno y las buenas prácticas al momento de la instalación. Para los ejemplos desarrollados se estima un período de 5 años. Teniendo en cuenta que el análisis debe hacerse a largo plazo, la ecuación que define el punto óptimo de inversión es la siguiente.

$$C_T \leq \sum_{i=1}^5 \left[ (A_{p, inicial} - A_{p, final}) \frac{(1+t)^i}{(1+r)^i} P_A \right] \quad [6]$$

En la anterior ecuación,  $C_T$  corresponde al costo total en rehabilitación que se requiere hasta realizar cierto número de cambios,  $A_p$  es el volumen de agua que entra al sistema (calculado para un año),  $t$  corresponde a la inflación (alrededor del 6 % para Colombia) y  $P_A$  corresponde al precio por metro cúbico de agua (precio únicamente asociado al costo marginal de producción del agua potable). En general, una buena rentabilidad esperada para una inversión en el sector de servicios públicos se ubica entre el 10 % y el 15 %.

### 3. Procedimiento

Antes de implementar la metodología propuesta, se deben identificar los diámetros comerciales con los cuales se puede rehabilitar la tubería y sus rugosidades. Además, se debe incluir información del costo de agua, de los coeficientes para determinar el costo de rehabilitación, de la rentabilidad esperada por la empresa y del número de años de la inversión. La metodología se aplica idealmente a una red calibrada, cuyos nodos tienen asignados los exponentes y coeficientes emisores que representan las fugas del sistema; sin embargo, como objeto de estudio, se plantea un punto de partida en el cual se hacen suposiciones sobre el IANC de la red y los valores del exponente y coeficiente emisor de cada nodo.

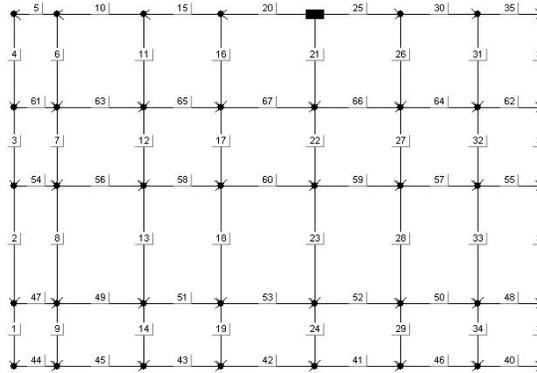
El algoritmo desarrollado para llevar a cabo la rehabilitación priorizada de una red de distribución con base en el concepto de potencia unitaria ( $P_{UT}$ ) fue implementado como un módulo del programa REDES (CIACUA, 2006). A continuación se presentan los pasos de este algoritmo.

1. Se analiza hidráulicamente la red y se incrementa al siguiente diámetro comercial el diámetro del tubo cuyo  $P_{UT}$  sea mayor.
2. Si el tubo ha sido cambiado anteriormente, los coeficientes de emisores en sus nodos no deben ser modificados. Si no ha sido cambiado, se debe mirar cuántos tubos llegan al nodo inicial y se debe restar al coeficiente emisor de este nodo la parte que proporcionalmente le corresponde al tubo cambiado (esto se debe a que se supone que el aporte de cada tubo en el factor de emisores asignado a dicho nodo es homogéneo). El mismo procedimiento se realiza para el nodo final.
3. Se analiza hidráulicamente la red. Si el cambio realizado tiene como consecuencia que uno o más nodos queden con presión por debajo de la mínima requerida, se reestablece el diámetro inicial del tubo cambiado y se selecciona el tubo con el siguiente mayor valor de  $P_{UT}$ ; el diámetro de este tubo se incrementa al diámetro comercial inmediatamente mayor. Si esto no sucede, se continúa directamente con el paso 5.
4. Repetir los pasos 2 y 3 hasta lograr que ningún nodo quede con presión inferior a la mínima requerida.
5. Después de calcular la hidráulica de la red incluyendo el cambio realizado, a la altura piezométrica en el embalse se le resta la diferencia entre la presión mínima en los nodos y la presión mínima requerida.
6. Se calculan los indicadores. Igualmente, se estima el costo por reemplazo de tuberías y el beneficio económico generado por el ahorro en agua logrado con los cambios realizados hasta este punto.
7. Si la diferencia entre el valor presente del beneficio y el costo de rehabilitación es menor que cero, la inversión deja de ser viable y se finaliza el proceso. De lo contrario, se regresa al primer paso (1).

### 4. Redes Analizadas

#### 4.1. Red Hipotética, R28 (Saldarriaga, 2001)

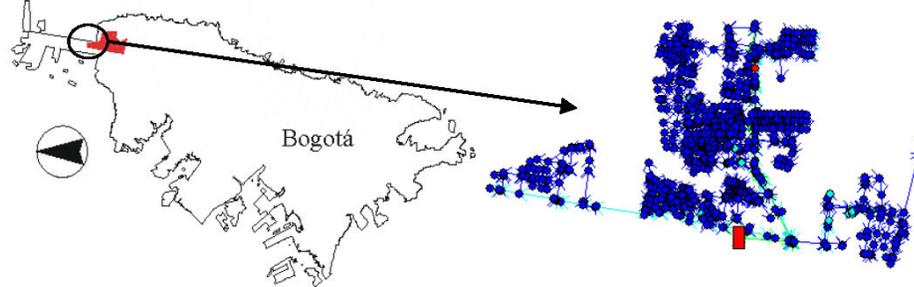
La primera red analizada es una red teórica, compuesta por 67 tubos, 39 nodos y un embalse con una altura piezométrica de 100 m.c.a. Tiene una longitud total de 9750 m y una demanda de 72 lps. Las tuberías son de PVC con rugosidad de 0.0015 mm y diámetros que varían entre 2 y 8 pulgadas.



**Figura 1. Red Hipotética R28, con identificador de tubos.**

#### 4.2. Sector 35 (CIACUA, 2001)

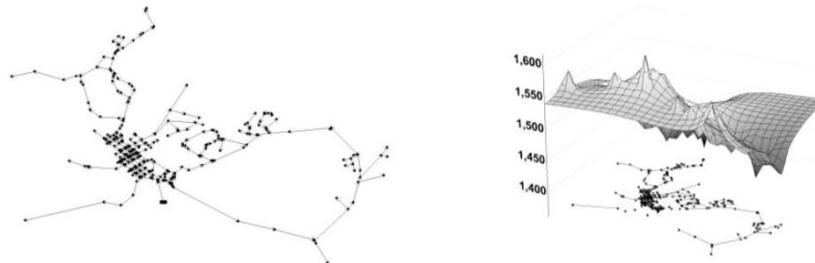
Sector 35 es una zona hidráulica del Distrito Capital de Bogotá. Su ubicación dentro de la ciudad se presenta en la Figura 2. La ciudad de Bogotá está ubicada sobre una meseta a 2592 m.s.n.m. Esta red está compuesta por 1289 tubos, 1190 nodos y un embalse que maneja una presión de 2639.77 m.c.a. Todos sus componentes tienen un rango de cotas muy homogéneo. Tiene una longitud total de 39426 m y una demanda de 60,5 lps.



**Figura 2. Ubicación de la red Sector 35 en la Ciudad de Bogotá D.C.**

#### 4.3. La Cumbre (CIACUA, 2005)

La Cumbre es un municipio del Departamento del Valle del Cauca, ubicado en el occidente de Colombia. Se encuentra localizado en una zona montañosa a 1591 m.s.n.m. lo que la hace ideal como ejemplo de red real con topografía variable (Ver Figura 3). Está compuesta por 378 tubos, 339 nodos y un embalse que maneja una presión piezométrica de 1620 m.c.a. Tiene una longitud total de tuberías de 28405 m y una demanda de 6.2 lps.



**Figura 3. Red de La Cumbre – topografía entre 1400 y 1600 m.s.n.m.**

## 5. Resultados

Todas las redes fueron inicialmente llevadas a su punto límite de presión bajo el escenario de un IANC de 50% representado en una asignación homogénea de coeficientes emisores en todos sus nodos. Este punto inicial fue diseñado en cada red para  $x_f$  de 0.5, 0.8, 1.0 y 1.5.

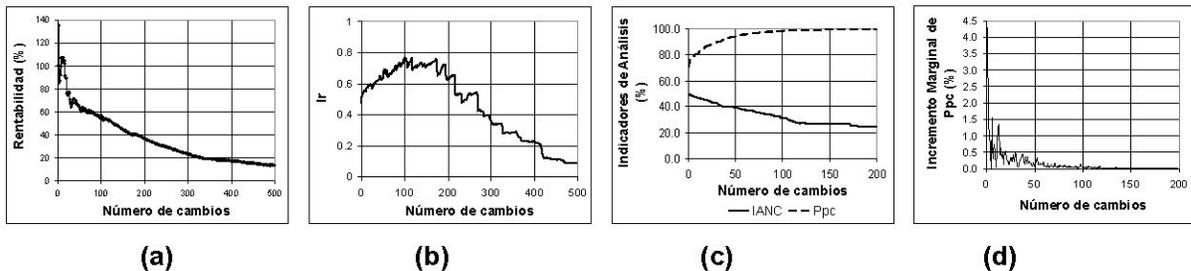
### 5.1. Red Hipotética, R28

Esta red cuenta con una demanda muy alta para la longitud de tubería existente. Las condiciones iniciales de la red para la asignación de  $x_f = 0.5$  e IANC = 50 % fueron: rango de presiones, 17 m.c.a.; altura piezométrica del embalse, 35.3 m.c.a.; e  $I_r = 0.47$ .

En la

(a) (b) (c) (d)

Figura 4 se muestra la variación de la rentabilidad, del  $I_r$ , del IANC y de la  $P_{PC}$  y el incremento marginal de la  $P_{PC}$  a medida que aumenta el número de cambios de tubos en la red.



**Figura 4. Resultados red R28: (a) Rentabilidad, (b)  $I_r$ , (c) IANC y  $P_{PC}$ , (d) incremento marginal de  $P_{PC}$  vs. Número de cambios (para  $x_f = 0.5$  y un período de amortización de 5 años)**

En la Figura 4 (a) se puede observar que los cambios sobre esta red son muy rentables; esto se debe al alto caudal que maneja. En cuanto al  $I_r$ , en la Figura 4(b) se puede ver que hasta el punto en que se han realizado 200 cambios, este índice aumenta con respecto al valor inicial, pero después de los 200 cambios disminuye. El resultado esperado con respecto al  $I_r$  era que, al asignar a todos los nodos la presión mínima, éste disminuyera. Por lo tanto, es paradójico que inicialmente el  $I_r$  tienda a aumentar. Sin embargo, si se analiza cómo al ir eliminando las grandes diferencias de presión la red se va liberando de patrones rígidos de dirección de flujo, se entiende por qué una red más uniforme puede conservar su resiliencia a pesar de manejar presiones muy bajas en la mayoría de sus nodos. En la Figura 4(c) se puede observar que el IANC disminuye de manera considerable, especialmente con los primeros cambios, y que el porcentaje de potencia consumida ( $P_{PC}$ ) incrementa, lo que indica que se logra un aumento en la eficiencia de la red en cuanto a consumo de energía. La Figura 4(d) puede ser empleada como un indicador del momento en que es conveniente detener la rehabilitación; ésta muestra que alrededor de los 50 cambios se produce el último pico en el incremento marginal de  $P_{PC}$ , por lo que éste podría considerarse como un punto apropiado para detener el proceso de cambios de tuberías.

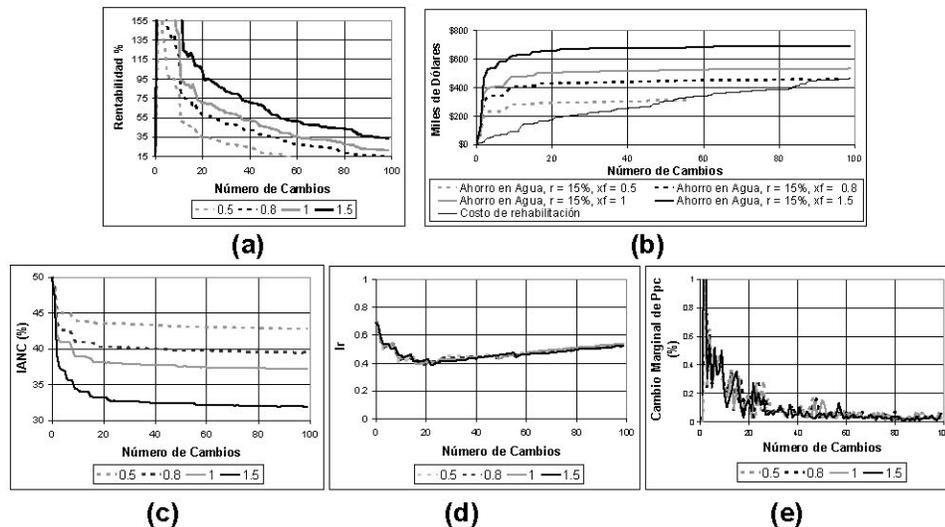
## 5.2. Sector 35

Sector 35 es una red con demandas y longitud de tubos alta. Cabe anotar que la red R28 tiene una mayor relación demanda/longitud que Sector 35. Las condiciones iniciales de la red para la asignación de  $x_f = 0.5$  e IANC = 50 % fueron: rango de presiones, 15 m.c.a.; altura piezométrica del embalse, 2622.9 m.c.a.; e  $I_r = 0.70$ . En la Figura 5 se presentan los resultados obtenidos para la red Sector 35; en este caso se hizo además un análisis de sensibilidad para diferentes valores del exponente del emisor  $x_f$ .

Las Figura 5 (a) y (b) muestran, para diferentes valores de  $x_f$ , la evolución de la rentabilidad, del valor del ahorro en agua y del costo de rehabilitación a medida que se incrementa el número de cambios. Se puede observar que estas variables cambian significativamente con los diferentes valores del exponente del emisor; es pues notorio que la rentabilidad de la rehabilitación sí depende del tipo de orificio que se tenga. Por consiguiente, invertir previamente en calibrar la red y en estudiar las causas del origen de cada tipo de orificios contribuye sustancialmente a la precisión de la metodología.

Otro indicador que tiene una fuerte dependencia del tipo de orificio es el IANC. La Figura 5 (c) ilustra cómo a medida que el  $x_f$  crece y los orificios son más flexibles, el IANC se puede reducir más con el mismo número de cambios. Este fenómeno explica la mayor rentabilidad en proyectos de rehabilitación de redes con orificios más flexibles; este beneficio se fundamenta en el volumen de agua que se deja de perder y no en el costo en la rehabilitación.

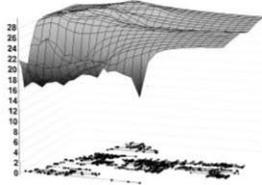
A diferencia de los indicadores mencionados, existen dos variables que no parecen depender de la variación del  $x_f$ . Las Figura 5 (d) y (e) presentan la evolución del  $I_r$  y del incremento marginal de  $P_{PC}$  con el número de cambios de tuberías. En estos gráficos se puede observar que, en términos de potencia empleada y disipada por la red ( $I_r$  y  $P_{PC}$ ), no existe una variación por tipo de fuga u orificio.



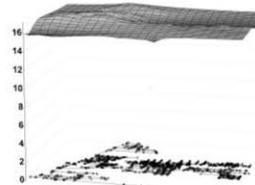
**Figura 5. Resultados red Sector 35: (a) Rentabilidad, (b) valor del ahorro en agua y costo de la rehabilitación, (c)  $I_r$ , (d) IANC y (e) cambio marginal de  $P_{PC}$  vs. Número de cambios (para diferentes  $x_f$ )**

Al realizar el análisis económico del proceso de rehabilitación sobre esta red, se concluyó que un punto óptimo de inversión eran los primeros 55 cambios de tubería. La Figura 6 presenta el plano de presiones

iniciales de la red y la Figura 7 presenta el plano de presiones después de los 55 cambios. Al comparar estas dos figuras se puede ver que la metodología propuesta logró uniformizar significativamente el plano de presiones de la red, lo cual tiene grandes beneficios en términos de eficiencia energética. En este punto, la red tiene presiones en un rango de 2.14 m.c.a.; un  $I_r = 0.44$ ;  $I_{ANC} = 43 \%$ ; y  $P_{PC} = 93.2 \%$  (que inició en 84.5 %). Para llegar a este punto se requiere una inversión inicial de 300 mil dólares americanos que, amortizados a 5 años, generan una rentabilidad de 16 %.



**Figura 6. Plano de presiones inicial de Sector 35.**



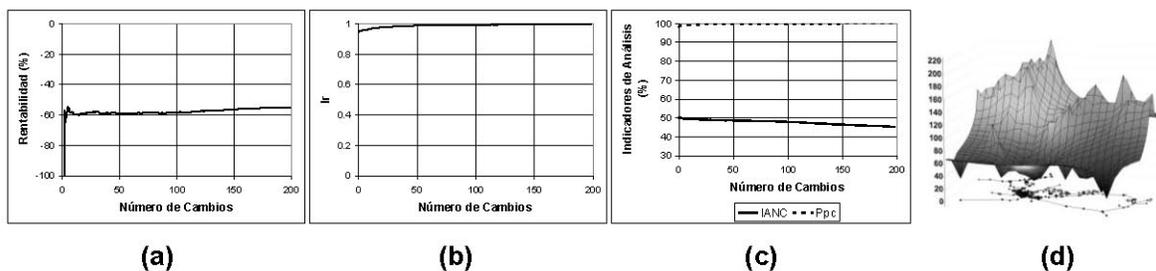
**Figura 7. Plano de presiones de Sector 35 después de los 55 cambios**

Los resultados obtenidos para Sector 35 son excelentes e indican que la metodología de  $P_{UT}$  puede ser ideal para redes de gran tamaño y horizontales. Se planteó entonces la siguiente hipótesis: la rentabilidad de esta propuesta metodológica para rehabilitar redes radica principalmente en la relación existente entre la longitud en tubería de la red y la demanda base. Esta hipótesis se comprobó con otras redes reales y se determinó que redes con demandas pequeñas pero con gran cantidad de tuberías difícilmente van a generar una rentabilidad. Sin embargo, si bien la metodología no genera rentabilidad, sí tiene consecuencias benéficas sobre el  $I_{ANC}$ , lo que genera beneficios sociales y ambientales.

### 5.3. La Cumbre

La Cumbre es una red con muy bajas demandas y longitud de tubos alta. Las condiciones iniciales de la red para la asignación de  $x_r = 0.5$  e  $I_{ANC} = 50\%$  fueron: rango de presiones, 208 m.c.a.; altura piezométrica del embalse, 1613.5 m.c.a.; e  $I_r = 0.94$ .

De los resultados obtenidos del análisis, se recomienda detener la rehabilitación en el cambio 96. En la siguiente figura se presentan los resultados de rentabilidad,  $I_r$  y  $P_{PC}$  obtenidos para esta red.



**Figura 8. Resultados red La Cumbre: (a) Rentabilidad, (b)  $I_r$ , (c)  $I_{ANC}$  y  $P_{PC}$  vs. Número de cambios (para  $x_r = 0.5$  y un período de amortización de 5 años), (d) Plano de presiones después de 96 cambios.**

Como se observa en la Figura 8, la rentabilidad obtenida es siempre negativa, lo que corrobora la hipótesis planteada según la cual la rentabilidad de la rehabilitación depende de la relación entre la demanda base y la longitud total de tubería. Así, en redes como La Cumbre, que tienen muy bajas demandas en comparación con la alta longitud de tubería, la rehabilitación no resulta rentable. Además, el  $I_r$  y la  $P_{PC}$  no varían mucho; esto se debe a las condiciones topográficas de la red. Sin embargo, se puede observar también que la metodología logra disminuir el IANC, lo que genera beneficios ambientales y sociales que deberían tenerse en cuenta en el análisis de factibilidad del proyecto.

En la Figura 8 (d) se puede ver que no se presentó variación significativa en el plano de presiones y en el rango de presiones de la red; esto lleva a pensar que el método no genera beneficios para esta red. Sin embargo, al estudiar la topografía de la red (Ver Figura 3) se puede ver cómo los picos del plano de presiones concuerdan con las depresiones en la topografía y viceversa. Esto sugiere que la dificultad para uniformizar presiones se debe a la topografía altamente variable de la red.

## 6. Conclusiones

La aplicación del concepto de potencia unitaria como mecanismo de selección de tubos a rehabilitar resulta bastante eficiente en redes de gran tamaño y con longitud de tubería corta en relación con la demanda total. Además de generar opciones de rehabilitación rentables en estas redes, la metodología también logra disminuir su vulnerabilidad y mejorar sustancialmente la eficiencia de éstas en cuanto a consumo de energía (ya que se incrementan el  $I_r$  y el  $P_{PC}$ ).

Al comparar los resultados encontrados para las diferentes redes analizadas, es evidente que la rentabilidad de la rehabilitación de una red está fuertemente ligada a la relación que existe entre la longitud de tubería y la demanda total de agua; a mayor demanda y menor longitud de tubería, más rentable es la rehabilitación.

Si bien en redes con gran longitud de tuberías y bajas demandas no es posible lograr que la rehabilitación sea rentable, la metodología propuesta consigue disminuir considerablemente el IANC en estas redes, lo cual genera grandes beneficios sociales y ambientales que pueden justificar la inversión en la rehabilitación.

La rentabilidad de la rehabilitación de una red puede variar considerablemente con el tipo de orificio o fuga; por lo tanto, es importante que la red se encuentre bien calibrada antes de aplicar la metodología propuesta. También se hizo evidente que redes más uniformes permiten manejar menores presiones en sus nodos de entrada, dado que este tipo de redes son más flexibles en términos de las posibles rutas de flujo; como consecuencia, redes uniformes permiten una menor holgura en las presiones de entrada requeridas.

Por otro lado, el algoritmo de selección de tubos a reemplazar con base en el concepto de potencia unitaria es un algoritmo simple y corto, por lo que su tiempo de ejecución es muy pequeño en comparación con otras metodologías de rehabilitación existentes.

Así pues, la metodología propuesta constituye una herramienta útil y eficiente para la planeación y ejecución de obras de rehabilitación de redes de distribución, consiguiendo optimizar la inversión en

términos económicos y mejorando enormemente el comportamiento hidráulico y la eficiencia energética de las redes.

## 7. Referencias

- Araque, D. & J.G. Saldarriaga. "Water Distribution Network Operational Optimization by Maximizing the Pressure Uniformity at Service Nodes" *Proceedings of the 8<sup>th</sup> Annual International Symposium on Water Distribution Systems Analysis*. Cincinnati, Ohio: Department of Civil and Environmental Engineering, University of Cincinnati, August 27 – 30, 2006.
- Colombo, A.F. & B.W. Karney. "Energy and Costs of Leaky Pipes: Toward Comprehensive Picture" *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE Vol. 128, No. 6. November/December 2002: 441 – 450.
- Diseño e Implementación de un Plan Estratégico de Gerencia de Redes de Distribución de Agua Potable de: Andalucía, Ansermanuevo, Bolívar, Bugalagrande, Candelaria, Ginebra, Guacarí, La Cumbre y Toro*. Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados, CIACUA. Universidad de los Andes: 2005.
- Jurado, M. & J.G. Saldarriaga. "Water Distribution Network Calibration under Leaks Environment". *World Environmental and Water Resources Congress 2007: Restoring our Natural Habitat*. Tampa, Florida: May 15 – 19, 2007.
- Ketler, A.J. & I.C. Goulter. "An Analysis of Pipe Breakage in Urban Water-Distribution Networks" *Can. Journal of Civil Engineering*, 12. 1985: 286 – 293.
- Kingdom, B., R. Liemberger & P. Marin. "The Challenge of Reducing Non-Revenue (NRW) Water in Developing Countries. How the Private Sector can Help: A Look at Performance-Based Service Contracting" *Water Supply and Sanitation Sector Board Discussion Paper Series*. Paper No. 8, December 2006 <<http://siteresources.worldbank.org/EXTWSS/Resources/challengeofreducingnonrenewewater.pdf>>
- Kleiner, Y., B.J. Adams & J.S. Rogers. "Water Distribution Network Renewal Planning" *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE Vol. 15, No. 1. January 2001: 15 – 26.
- Saldarriaga, J.G., D. Rodríguez & M.A. Serna. "Experience in the Application of a Methodology for Determination of Optimal Pressure in Water distribution Networks" *Proceedings of the 8<sup>th</sup> Annual International Symposium on Water Distribution Systems Analysis*. Cincinnati, Ohio: Department of Civil and Environmental Engineering, University of Cincinnati, August 27 – 30, 2006.
- Saldarriaga, Juan G. *Hidráulica de Tuberías*. Bogotá, Colombia: McGraw Hill, 2001.
- Shamir, U. & C.D.D. Howard. "An Analytical Approach to Scheduling Pipe Replacement" *Journal AWWA*, Vol. 71, No. 5. May 1979: 248 – 258.
- Schneider, C.R., Y.Y. Haines, D. Li, & J.H. Lambert. "Capacity Reliability of Water Distribution Networks and Optimum Rehabilitation Decision Making" *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 7. July 1996: 2271 – 2278.
- Todini, Ezio. "Looped Water Distribution Networks Design Using a Resilience Index Based Design" *Urban Water*. Vol. 2. September 2000: 115 – 122.