

Beneficios económicos de la rehabilitación de redes de distribución de agua potable

Fernando Pérez Monteagudo

Centro de Investigaciones Hidráulicas, Cuba

Cuando existen importantes deficiencias hidráulicas o estructurales en las redes de distribución de agua potable que pueden implicar también problemas en la calidad del agua, generalmente se considera su rehabilitación como una opción para mejorar la calidad del servicio que presta la entidad suministradora. La decisión de rehabilitar se puede fundamentar demostrando los importantes beneficios económicos que puede reportar, pero que frecuentemente se consideran de una forma parcial e insuficiente. Esto ha implicado que las decisiones hayan tenido que ser complementadas con criterios de beneficio de tipo social. Además, la tendencia general ha sido analizar las ganancias económicas de la rehabilitación de tuberías aisladas y no el efecto global que puede tener esto en toda la red de tuberías. En el presente trabajo se fundamenta la necesidad de realizar un análisis exhaustivo e integral de todos los beneficios de la rehabilitación de los sistemas de distribución de agua potable. Esto debe considerar además los efectos en toda la red, lo que se basa en varios años de experiencia en la rehabilitación de las redes de agua potable en la ciudad de La Habana, Cuba. Consecuentemente, se establece una metodología para ello.

Palabras clave: rehabilitación, redes de distribución de agua potable, tuberías, beneficios económicos, recursos hídricos, tecnologías sin zanja, ahorro de energía, pérdidas de carga.

Introducción

En general, la rehabilitación puede considerarse como un amplio conjunto de actividades que son necesarias para transformar un sistema de abasto de agua deficiente o inadecuado, en otro que alcance la calidad de servicio requerida. Estas actividades agrupan también las técnicas de mantenimiento y mejora de la eficiencia de un abastecimiento, desde la simple reparación hasta una sustitución global, incluyendo todas las acciones capaces de restituir al sistema averiado a su estado operativo.

Un sistema de abastecimiento necesita rehabilitarse cuando alcanza un estado en el que ya no puede cumplir las misiones para las que fue diseñado. El elemento clave de esas misiones es la satisfacción de las necesidades de los abonados en términos de cantidad y calidad del agua suministrada. El proceso de toma de decisiones acerca de la mejor estrategia para rehabilitar un sistema debe tener en cuenta estos aspectos y su repercusión económica (Cabrera *et al.*, 1996).

Para mejorar la explotación de un abastecimiento reduciendo las pérdidas volumétricas y energéticas tan-

to de fugas por localizar como de roturas para reparar, unas de las alternativas más importantes a considerar son las técnicas de rehabilitación sin necesidad de abrir zanjas (llamadas comúnmente "sin zanja") frente a la reposición tradicional a cielo abierto.

Estas técnicas son especialmente apropiadas donde concurren algunas circunstancias como:

- Que por envejecimiento se afectan sus características de uso, disminuyendo la calidad del servicio.
- Que por su situación, cualquier fuga produzca un impacto sobre las infraestructuras de pavimentación que aconseje su renovación, además de los nocivos efectos que las pérdidas de agua crean en un sistema de abasto.

Así, la necesidad de rehabilitar los sistemas debe considerar la determinación del estado, condiciones y solicitaciones del sistema hidráulico existente, así como la identificación de las causas y efectos del deterioro de las instalaciones.

Entre las causas más frecuentes se pueden citar (Cabrera *et al.*, 1996):

- Incrustaciones: óxido de hierro y depósitos calcáreos.
- Perforaciones por efecto de la corrosión.
- Sobrecargas externas que provocan asentamientos en el terreno.
- Disminución de la resistencia mecánica de la tubería.

Los efectos derivados son principalmente:

- Rotura de las tuberías, lo cual repercute en la infraestructura e interrumpe el servicio.
- Disminución de la sección útil y, por tanto, caudal insuficiente e incremento de las pérdidas por fricción.
- Pérdidas de agua.
- Deterioro de la calidad del agua.

Siempre es posible considerar como alternativas en la rehabilitación la utilización de las técnicas de rehabilitación "sin zanja", aprovechando gran parte de la excavación existente o la sustitución tradicional por una nueva.

Algunos factores que pueden influir en la toma de decisiones entre ambos sistemas son:

- Costos comparativos entre las dos alternativas.
- Impacto sobre el entorno, considerando las regulaciones urbanas y la reposición del pavimento y de otras redes afectadas, lo que puede condicionar los plazos de ejecución de la obra.
- Fiabilidad, valorando la probabilidad de fallo y de vida útil para cada tipo de solución.

Dado que los objetivos rectores de todo este proceso deben ser garantía, calidad y economía, el buen estado de las instalaciones requiere de una estrategia adecuada de rehabilitación que se apoye en criterios objetivos de rentabilidad social y económica.

Desarrollo de las técnicas de rehabilitación. Costos y beneficios

Las técnicas de rehabilitación sin zanja pueden clasificarse en (Cabrera *et al.*, 1996; Pérez Monteagudo, 1998):

- *General o total* que afecta toda la tubería. Si la tubería no ha perdido su capacidad mecánica, pero sí hidráulica puede ser *no estructural*, y *estructural* si, además de las características hidráulicas, la tubería ha perdido su resistencia mecánica.
- *Parcial o reparaciones* que no afectan la totalidad de la tubería dando solución a problemas muy localizados como en las juntas.

- *Sustitución*. Se sustituye totalmente la tubería anterior por medio de la inserción de una tubería nueva, rompiendo la existente y, eventualmente, instalando una tubería de diámetro mayor si se requiere.

Aunque desde 1845 se comenzó a revestir interiormente tuberías con mortero de arena y cemento en Nueva Jersey, no fue en realidad hasta mediados del presente siglo que esta técnica evolucionó para convertirse en una tecnología efectiva de rehabilitación sin zanja (Pérez Monteagudo, 1998).

El proceso pasa básicamente por las siguientes etapas:

- Instalar un servicio provisional de abasto de agua para la población servida por la tubería a rehabilitar.
- Excavar accesos y cortar la tubería convenientemente. Remoción de accesorios que limitan la ejecución de las etapas posteriores.
- Someter a la tubería a un proceso de limpieza interior mediante elementos mecánicos o plásticos (Aqua-Pigs, 1996) y a un lavado hidráulico. La limpieza en sí misma puede considerarse como una alternativa de rehabilitación en determinados casos de pérdida de la capacidad de servicio (Walski, 1984).
- Colocar un revestimiento interior que permita restaurar al máximo posible las características originales de la tubería sin sustituirla (Walski, 1984).
- Control de la calidad del proceso, lo que puede hacerse por medio de sistemas de televisión industrial (Pérez Monteagudo, 1990).
- Realización de las pruebas hidráulicas, desinfección y reconexión al sistema.
- Restablecimiento de las condiciones originales del pavimento y redes afectadas.

Los revestimientos interiores con mezclas de cemento son de dos tipos: mortero centrifugado y pastas de cemento inyectado. La modalidad de mortero centrifugado o lanzado es todavía la más común en países como los Estados Unidos de América (Spiniello, 1996). En la ciudad de La Habana, Cuba, se aplicó una tecnología de mortero inyectado (Pérez Monteagudo, 1990), como se describirá más adelante.

La introducción de materiales sintéticos para el revestimiento interior de tuberías en sustitución de las mezclas de cemento comenzó a desarrollarse a fines de la década de los sesenta y de acuerdo con el tipo de material sintético empleado se distingue una importante variedad de marcas y compañías, pero, en esencia el proceso sigue siendo el mismo. La evolución de la tecnología ha consistido principalmente en incrementar las longitudes entre excavaciones de ac-

ceso para minimizar los costos y en aplicar materiales de revestimiento interior de una mayor durabilidad, resistencia estructural y lisura (Pérez Monteagudo, 1998; Cabrera *et al.*, 1996). Quizá una de las tecnologías más difundidas en esta modalidad es la conocida como "Insituform" (1997). En este caso, una manguera o manga, recubierta con una resina especial, es introducida por presión de agua en la tubería a rehabilitar una vez limpiada, comprimiendo la manguera contra la pared del conducto. Cuando la manguera está totalmente extendida, se calienta el volumen de agua que contiene para endurecer las resinas que recubren la manguera y así se crea el revestimiento interior deseado. El uso del calor es una característica común a las tecnologías que utilizan materiales sintéticos para el revestimiento y puede influir en los costos y en su selección. Hay tecnologías que utilizan como revestimiento interior tuberías sintéticas de un material especial y con un diámetro exterior mayor que el interior de la tubería a rehabilitar. Esta tubería se calienta mediante un equipo que además la hace pasar por un elemento mecánico que reduce el diámetro a un tamaño tal que le permite ser introducido en la tubería por rehabilitar. Cuando este revestimiento se enfría tiende recuperar su diámetro original, lo que lo acopla eficazmente a la tubería que se rehabilita (Pérez Monteagudo, 1998).

Como ya se expresó, existen también técnicas que rompen la tubería antigua e insertan una nueva que puede ser de mayor diámetro (Cabrera *et al.*, 1996). La conocida como "Pipe Bursting" (1995) es probablemente la más representativa. Esta técnica sin zanja puede considerarse tanto de construcción de una nueva tubería como de rehabilitación, pues a pesar de instalar una tubería nueva aprovecha de la antigua gran parte de la excavación.

Como toda inversión, la decisión de rehabilitar debe estar sustentada por un análisis de costo-beneficio.

Walski (1984) presenta un excelente resumen de los factores que influyen en el costo de las tecnologías de rehabilitación sin zanja. Como la definición de estos factores se basa en las etapas de la rehabilitación y éstas han mantenido su vigencia, independientemente de la tecnología, los factores son, fundamentalmente:

- Diámetro y tipo de tubería.
- Tamaño global del trabajo.
- Localización geográfica del sistema.
- Alineación de la tubería.
- Tamaño, localización y tipo de válvulas, y otros accesorios.
- Profundidad y material de la cubierta. Tipo de pavimento.

- Daño a la vialidad, otras redes soterradas, tránsito y vida urbana.
- Acceso al lugar.
- Longitudes que pueden colocarse al mismo tiempo.
- Requerimientos del servicio provisional.
- Cantidad de trabajo realizado por la entidad de abasto de agua.
- Época del año.
- Duración del trabajo.
- Materiales y requerimientos específicos de la tecnología, como energía para el calentamiento de materiales sintéticos.
- Mano de obra.

Con tantos factores afectando el costo es lógico que éste varíe en un rango muy amplio y que dependa mucho de las condiciones específicas de la aplicación. Las diferencias entre tecnologías influirán sobre todo en los costos relativos a materiales y mano de obra, los que obviamente tendrán un peso específico relativamente bajo en el costo total. Es decir, que el costo total dependerá en una proporción importante de las condiciones de aplicación más que del tipo de tecnología. Lo que se ha podido demostrar es que, en general, el costo de rehabilitar una tubería por una técnica sin zanja puede estar en un rango de un 40 a un 55% del costo total de la sustitución por métodos tradicionales en las mismas condiciones de aplicación (Pérez Monteagudo, 1990, 1998).

Los importantes beneficios económicos que puede reportar la rehabilitación son frecuentemente considerados de una forma parcial e insuficiente. Esto ha implicado que las decisiones hayan tenido que ser complementadas con criterios de beneficio social, como relaciones públicas, consideraciones de salud u otros.

Por ejemplo, Walski (1984) desarrolla métodos para calcular los beneficios del incremento de la capacidad hidráulica de una tubería y no considera otros como los asociados con el ahorro de agua.

Por su parte, Vela *et al.* (1994) desarrollan ampliamente los beneficios relativos al ahorro del agua y no mencionan los derivados del incremento de la capacidad hidráulica, aunque hay que destacar que su trabajo está encaminado a fundamentar estrategias para la reducción de pérdidas de agua, en lo que la rehabilitación es un elemento más dentro del conjunto de medidas que proponen.

En el Manual de la American Water Works Association (AWWA, 1986), *Water main evaluation for rehabilitation/replacement*, la decisión de rehabilitar se fundamenta esencialmente por el menor costo de rehabilitar ante la disyuntiva de reemplazar una tubería, y se basa en un modelo económico en donde se considera que

la rehabilitación es una acción que difiere el reemplazo en el tiempo.

Tanto Walski (1984) como el ya citado manual de la AWWA solamente analizan los beneficios económicos de la rehabilitación de tuberías aisladas y no el efecto global que puede tener en toda la red de tuberías. La experiencia de la rehabilitación de redes de distribución de agua potable en la ciudad de La Habana, según refiere Pérez Monteagudo (1990), demuestra que los beneficios de la rehabilitación se maximizan cuando se aplican concentradamente en las tuberías afectadas de un mismo circuito. Cabrera *et al.* (1995) aportan elementos que permiten tener en cuenta el efecto global en la red, aunque lamentablemente sólo consideran el reemplazo, la reparación y un programa de detección de fugas y reparación, como variantes para enfrentar el mantenimiento de una red de distribución y no tienen en cuenta la rehabilitación.

Lo antes expresado permite fundamentar la necesidad de analizar lo más exhaustiva e integralmente posible la forma de evaluar de forma económica todos los beneficios de la rehabilitación de los sistemas de distribución de agua potable, considerando, además, el enfoque de analizar los efectos en toda la red y no aisladamente en cada tubería. En el presente trabajo se hará énfasis, por tanto, en el cálculo de los beneficios, ya que, como se vio anteriormente, el conjunto de factores que integran el costo está mucho mejor definido. También es importante tener en cuenta que la definición de los beneficios producidos por la rehabilitación de tuberías es prácticamente independiente de la tecnología aplicada.

Beneficios energéticos

Estos beneficios son muy importantes por su impacto directo en el ahorro de recursos energéticos y por lo general son los que aportan los valores más significativos. De ello se deriva el incremento de la capacidad hidráulica de las tuberías y la disminución del caudal por supresión de fugas.

Incremento de la capacidad hidráulica

Walski (1984) trata este aspecto de forma muy completa y logra cuantificar estos beneficios a pesar de que en el citado manual de la AWWA se consideran como un beneficio intangible. Walski se basa en la ecuación de Williams-Hazen para el cálculo de las pérdidas de carga en tuberías y su enfoque está fundamentado en que la justificación básica para limpiar, limpiar y revestir, o instalar una tubería paralela es la existencia de bajas presiones en la red, para ello se

basa en que la tecnología más utilizada es la de mortero de cemento centrifugado, a la que le atribuye pocas posibilidades para eliminar fugas (lo que no siempre es real), aunque menciona otras tecnologías que sí eliminan fugas en la red, pero no las considera en su análisis.

En síntesis, y para los propósitos del presente trabajo, lo que interesa destacar es que la evaluación de los beneficios producidos por un incremento de la capacidad hidráulica de la tubería se puede valorar por la ecuación de pérdidas que se utilice, lo que requiere de un estimado de los cambios positivos en la rugosidad de la tubería que se producen como consecuencia de la rehabilitación, y conocer o estimar la situación original antes de rehabilitar. Para ello, Walski utiliza la ecuación de Williams-Hazen y calcula la disminución de pérdidas de carga, producto de la rehabilitación como:

$$\Delta hf = \frac{10.649}{D^{4.87}} L Q^{1.852} \left[\frac{1}{C^{1.852}} - \frac{1}{C_r^{1.852}} \right] \quad (1)$$

Donde:

- Δhf es la diferencia de pérdidas de carga antes y después de rehabilitar la tubería, en metros.
- D es el diámetro de la tubería, en metros.
- L es la longitud de la tubería, en metros.
- Q es el caudal, en metros cúbicos sobre segundo.
- C es el valor del coeficiente de Williams-Hazen de la tubería sin rehabilitar.
- C_r es el valor del coeficiente de Williams-Hazen de la tubería rehabilitada.

Sin embargo, este enfoque de Walski no considera el incremento de la capacidad hidráulica que puede producirse debido a que el diámetro de la tubería sin rehabilitar puede ser sensiblemente menor que el de la rehabilitada. El efecto conjunto de la C y el diámetro disminuidos, producto de la corrosión o las incrustaciones, puede ser difícil de medir o estimar directamente, por lo que el autor propone calcular las pérdidas antes de rehabilitar (hf), por la forma siguiente de la ecuación de Williams-Hazen:

$$hf = k L Q^{1.852} \quad (2)$$

El valor de k puede obtenerse de mediciones directas de las pérdidas de carga y contiene los valores de C y D que corresponden a la tubería antes de rehabilitar, lo que evita la necesidad de medirlos físicamente. Los valores de C_r y D_r (diámetro después de rehabili-

tar) sí son relativamente fáciles de estimar por los datos que brindan los suministradores de la tecnología de rehabilitación, por lo que las pérdidas después de rehabilitar (hf_r) se pueden calcular por la ecuación de Williams-Hazen en función directa de estos valores.

El cálculo del ahorro anual producido (B_E) puede calcularse multiplicando la potencia ahorrada por el tiempo anual de bombeo en horas (t_b) y por el precio de la energía en \$/kW-h (p), como:

$$B_{E1} = 9.81.Q.(hf - hf_r).pt_b/e \quad (3)$$

donde e es la eficiencia del conjunto bomba-motor.

Disminución del caudal por reducción de pérdidas de agua. Integración de todos los beneficios energéticos en una sola ecuación

La mayoría de las tecnologías de rehabilitación son capaces de disminuir las pérdidas de agua en la red de distribución de agua potable, lo que implica un notable ahorro de este recurso, cuyo beneficio económico es relativamente fácil de calcular.

Como se sabe, la disminución del caudal bombeado implica también una importante reducción en las pérdidas por fricción en la tubería que se analiza, ya que las pérdidas son aproximadamente proporcionales al cuadrado del caudal, como destacan Vela *et al.* (1994). Si coexisten, como es lógico, los beneficios del incremento de la capacidad hidráulica y de la disminución del caudal bombeado, los efectos combinados de ambos beneficios diferenciales se pueden calcular. Debe tenerse en cuenta que la potencia consumida es proporcional al caudal, por lo que al disminuir éste se produce también un ahorro significativo de energía, aspecto que no se señala por Vela *et al.*, ni en el manual de la AWWA, ni por Walski.

Con el propósito de poder analizar integralmente los beneficios relativos a la disminución de las pérdidas de agua con los correspondientes al incremento de la capacidad hidráulica, el autor propone la siguiente ecuación para calcular el beneficio diferencial, producto del efecto simultáneo de la disminución del caudal y el incremento del valor de C y del diámetro de la tubería:

$$B_{E2} = 9.81.pt_b/e \left[\Delta Z.\Delta Q + Q_r.hf - Q_r.hf_r \right] \quad (4)$$

Donde: $\Delta Q = Q_r - Q$

Q y Q_r son los caudales antes y después de rehabilitar, en metros cúbicos por segundo; ΔZ , diferencia de nivel contra la que se bombea, en metros; hf y hf_r son las

pérdidas de carga antes y después de rehabilitar, en metros, que se calculan con los valores de Q y k (que integra C y D) para hf y de Q_r , C_r y D_r para hf_r , directamente de la ecuación de Williams-Hazen.

Si el programa de rehabilitación es verdaderamente integral, como recomienda Pérez Monteagudo (1990), y en él se consideran otras medidas de ahorro de agua en el marco de una estrategia global para reducir las pérdidas en un sistema de abastecimiento (Vela *et al.*, 1994), en la ecuación 4 pueden considerarse también estos efectos.

Es interesante destacar que el término $\Delta Q.\Delta Z$ refleja la importancia energética del ahorro del vital líquido en ciudades en las que se bombea el agua venciendo grandes diferencias de nivel.

Beneficios asociados con la calidad del agua

La reducción en el volumen total aportado también reporta la disminución de los productos necesarios para el tratamiento y la desinfección del agua. Estos beneficios se pueden calcular fácilmente en función del volumen ahorrado y del costo de los productos dejados de consumir (Vela *et al.*, 1994).

También si la red está en buen estado, producto de una rehabilitación, se requieren menos cantidades de productos químicos para mantener una desinfección residual en la red, ya que disminuyen los riesgos de una contaminación "cruzada" con los efluentes de otras redes dañadas, como las de aguas residuales, lo que también puede valorarse económicamente.

La eliminación de "aguas rojas" (producto de la corrosión) puede permitir el uso de instalaciones invalidadas por su existencia, tales como piscinas, y también esto tendría un efecto económico calculable.

Beneficios técnicos

Disminución del riesgo

Como señalan Vela *et al.* (1994), este beneficio es uno de los más difíciles de cuantificar económicamente, pero también uno de los más importantes.

Dado que se trata de una inversión para aumentar la seguridad, debe definirse adecuadamente con y sin la rehabilitación.

El riesgo se puede definir como la incertidumbre de la ocurrencia de unas pérdidas y daños en general, consecuencia de un suceso-fallo o del deterioro del sistema y de la magnitud de éstos en tal caso (Vela *et al.*, 1994). Su magnitud es difícil de calcular por su propio carácter intrínseco. La expresión propuesta por Vela *et al.* (1994) para calcular el riesgo es:

$$\text{Riesgo} = \text{probabilidad} * \text{consecuencia} * \text{duración} \quad (5)$$

Las consecuencias se valoran en dinero por unidad de tiempo. La rehabilitación puede disminuir el riesgo de varias formas:

- Disminuyendo la probabilidad de ocurrencia (aumento de la fiabilidad del sistema).
- Reduciendo la magnitud del daño o de sus consecuencias.
- Disminuyendo el tiempo del estado anómalo.

Puede haber circunstancias en que se reduzcan los tres factores a la vez. El beneficio diferencial se calcula como la diferencia de riesgos con o sin rehabilitación:

$$B_R = \text{riesgo} - \text{riesgo}_r \quad (6)$$

Aumento de la eficiencia y eficacia del sistema

Es indudable que la rehabilitación contribuye a aumentar la eficiencia y eficacia del sistema, lo que se reflejará, entre otros beneficios, en una reducción de las reclamaciones.

Reducción de los costos de mantenimiento

Es evidente que después de realizarse una rehabilitación de una parte considerable de un sistema los costos globales de su mantenimiento deben disminuir.

Reducción de los costos de suministro de agua por vías alternativas

En determinadas zonas de sistemas deteriorados puede ser necesario suministrar agua por vías alternativas, como carros cisternas. La eliminación de este tipo de suministro puede obtenerse de un proceso de rehabilitación, como sucedió en la ciudad de La Habana (Pérez Monteagudo, 1990).

Aplazamiento de otras inversiones de ampliación del sistema de abastecimiento

Al frenarse el crecimiento de la demanda se pueden retrasar inversiones de ampliación y rediseño del sistema de abastecimiento o puede ser que ya no resulte necesario realizar esas inversiones (Vela *et al.*, 1994).

Según los citados autores, la contabilización rigurosa de este diferimiento en las inversiones, la disminución de su magnitud o su posible eliminación requiere que se actualice el valor de la inversión que considere los efectos inflacionarios. Para ello proponen calcular

la tasa de interés r' , como el resultado de corregir la tasa de interés r (vigente en el año en que se realiza el análisis) por el efecto de la tasa de inflación s , según las expresiones:

$$1+r' = \frac{1+r}{1+s}$$

$$r' = \frac{r-s}{1+s}$$

Siguiendo el desarrollo propuesto por Vela *et al.* (1994), si las inversiones previstas inicialmente $Io_1, Io_2, \dots, Io_j$ iban a realizarse en los años $k_1, k_2, \dots, k_j$, respectivamente y como consecuencia de la rehabilitación serán retrasadas a los años $m_1, m_2, \dots, m_j$, pudiéndose reducir sus valores o anularse, siendo éstos entonces $I_1, I_2, \dots, I_j$, el ahorro capitalizado al año actual será:

$$B_{l,act} = \sum_j \left(\frac{Io_j}{(1+r')^{k_j}} - \frac{I_j}{(1+r')^{m_j}} \right) \quad (7)$$

Disminución de afectaciones a otras redes, la vialidad, el tránsito y la vida urbana en general

Este beneficio está asociado con el uso de tecnologías de rehabilitación sin zanjas (Pérez Monteagudo, 1998), que pueden cuantificarse económicamente si existe un buen proyecto en el que se reflejen las redes soterradas y toda la información necesaria para ello. Así, se compara con las afectaciones que significaría reemplazar la tubería en lugar de rehabilitarla, incluyendo los desvíos de tránsito que implicarían recorridos adicionales, con el consiguiente incremento del consumo de combustible.

Disminución de los nuevos equipos de bombeo necesarios

Walski (1984) señala que éste es un factor que puede tenerse en cuenta cuando se compara la variante de rehabilitar con la de incrementar la carga de bombeo para resolver los problemas asociados con la baja presión en el sistema producida por las incrustaciones y la corrosión.

Disminución de la demanda del recurso agua

Este es un factor cuya importancia no se enfatiza lo suficiente en la literatura del tema, pues el enfoque de los análisis más comunes tiene como punto de vista rector

el del operador del sistema de abasto y no el del manejo integral de los recursos hidráulicos de una región. Desde este último punto de vista, el agua que se ahorre como consecuencia de la rehabilitación de un sistema de abasto de agua potable puede destinarse a otros usos, tales como el riego o el abasto a otros objetivos. Precisamente uno de los instrumentos principales del *manejo integrado de los recursos hídricos*, aplicable a entidades que se encargan de la operación de sistemas de agua potable y alcantarillado, abasto a industrias y a la agricultura, es el *manejo basado en la demanda*, que se refiere a cualquier medida técnica, regulatoria y económica diseñada para reducir el volumen de agua extraída de las fuentes, sin reducir la satisfacción del consumidor, lo que implica también reducir el volumen de aguas residuales producido. La rehabilitación de redes de abasto de agua potable es una de las técnicas más importantes consideradas al aplicar el principio del *manejo basado en la demanda* (Bathia *et al.*, 1995).

Se sugiere entonces valorar este beneficio diferencial a partir de los resultados económicos previstos como consecuencia de un incremento de los rendimientos de los cultivos beneficiados por el riego o por los ingresos debidos al cobro del servicio de agua a los nuevos objetivos. Aun cuando el ahorro del agua no implique nuevos ingresos económicos resulta evidente su importancia desde el punto puramente ambiental.

Beneficios diferenciales debidos a un menor costo de la rehabilitación respecto al reemplazo

Este aspecto es la base fundamental de la metodología presentada por el ya citado manual de la AWWA (1986), donde se expresa que la rehabilitación por limpieza y revestimiento es atractiva por ser más barata que el reemplazo (ya que es una tecnología sin zanja), lo que da la posibilidad de rehabilitar más kilómetros de tuberías con los limitados fondos de la entidad operadora.

Por basarse en la tecnología del mortero de cemento centrifugado parten del criterio de que la rehabilitación no elimina la necesidad del reemplazo eventualmente y consideran la rehabilitación como un método para prolongar la vida útil y diferir la sustitución. Esto puede no ser totalmente cierto. Existen otras tecnologías de rehabilitación capaces de prolongar la vida útil a valores equivalentes a un reemplazo, incluso en determinadas condiciones de aplicación de la tecnología del mortero centrifugado. No obstante, con este enfoque se puede tener un método más general para valorar los costos de la rehabilitación y se puede simpli-

ficar en el caso que se entienda que no es necesario considerar el reemplazo diferido.

Se considera que la opción de rehabilitar debe tener en cuenta el costo inicial de la rehabilitación y el costo de la sustitución en un año futuro, que es igual a la suma de la vida remanente inicial y el intervalo de servicio adicional asegurado por la rehabilitación. En el reemplazo, por su parte, se considera el costo del reemplazo al final de la vida remanente de la tubería.

Con un enfoque exclusivamente limitado a la comparación de ambos costos calculan el valor actualizado de la rehabilitación (VA_{REH}) como:

$$VA_{REH} = R_1 + R_2 \frac{(r + sj)^t}{(1+r)^t} \quad (8)$$

Donde:

r , tasa de interés.

sj , tasa de inflación del costo de reemplazo.

R_1 , costo actual de la rehabilitación. Como se expresó anteriormente, en la mayoría de las tecnologías de rehabilitación este costo resulta inferior a 50% del reemplazo.

R_2 , costo del reemplazo en el año inicial.

t , año en el que ocurre el reemplazo diferido. Es la suma de la vida remanente y el periodo de servicio adicional que se obtiene como consecuencia de la rehabilitación.

El valor presente de los costos del reemplazo futuro no diferido (VA_{RE}) se puede calcular por la ecuación:

$$VA_{RE} = R_2 \frac{(1 + sj)^{tr}}{(1+r)^{tr}} \quad (9)$$

Donde:

VA_{RE} , valor presente del reemplazo futuro no diferido.

tr , años estimados de vida remanente en la tubería original.

Entonces si $VA_{REH} < VA_{RE}$, se considera más conveniente rehabilitar que reemplazar, aunque señalan que aun cuando no se justifique la rehabilitación por este criterio, dicha acción podría estar justificada por otros beneficios considerados "intangibles" en el manual de la AWWA (1986), como el incremento de la capacidad hidráulica. Esto evidencia que el enfoque propuesto por el citado manual es limitado, pues se ha demostrado que es posible calcular también estos beneficios. Por tanto, se puede establecer que el beneficio diferencial de la rehabilitación respecto al reemplazo sería:

$$B_C = VA_{RE} - VA_{REH} \quad (10)$$

La rehabilitación de las redes de abasto de agua potable en La Habana

El sistema de abasto de agua de La Habana debe satisfacer la demanda de 2.18 millones de habitantes, que viven en 544,532 viviendas. Para ello se distribuyen diariamente 1.32 millones de metros cúbicos de agua, para una dotación general de 605 litros por persona por día.

La Habana es un caso excepcional entre las grandes ciudades del mundo, pues tiene un suministro de agua abundante. Existen 53 fuentes de abasto fundamentalmente de agua subterránea (sólo hay una de agua superficial y de poca importancia), lo que garantiza una excelente calidad del agua, cuyo único tratamiento es la desinfección por cloro. La mayoría de las fuentes principales (excepto el acueducto de Albear, como se verá más adelante) requieren del bombeo de grandes caudales desde distancias considerables (por ejemplo, 36 kilómetros desde el campo de pozos conocido como Cuenca Sur y 53 kilómetros desde el conocido como El Gato), lo que convierte al sistema de abasto de la capital cubana en su consumidor de energía más importante.

Los conductos desde las fuentes a las redes tiene una longitud total de 341 kilómetros y las redes de distribución comprenden 3,585 kilómetros de tuberías en diámetros que van desde 100 hasta 2,000 milímetros y que están instaladas bajo prácticamente toda la red vial de la ciudad.

El suministro de agua de la capital ha sido históricamente deficiente. Desde comienzos del siglo XX, los servicios de agua y saneamiento no se han incrementado al mismo ritmo que el resto de la infraestructura urbana y el crecimiento de la población. A pesar de que la cantidad de agua suministrada actualmente sería suficiente para dar un servicio adecuado a toda la población durante las 24 horas del día y que la cobertura es prácticamente de 100%, el agua se entrega en horarios limitados, y con presiones y caudales insuficientes. El servicio es intermitente, lo que también es fuente de contaminaciones secundarias.

Una de las causas fundamentales de las insuficiencias del servicio es que una proporción importante del agua abastecida se pierde por fugas en conductores, redes de distribución y en el interior de las viviendas, estimándose en un 55% el agua perdida por este concepto, lo que implica además un consumo excesivo de energía eléctrica.

Entre los conductores principales con mayores problemas técnicos están los siguientes:

- Canal de Albear, por el que circula agua desde 1878.

- Conductora antigua del acueducto de Fernando VII (1835).
- Conductoras antiguas de 1,070 milímetros del sistema de distribución del acueducto de Albear (1893 y 1915).
- Tramos dañados del conductor desde Cuenca Sur (2,000 milímetros de diámetro).
- Tubería de 450 milímetros desde Palatino hasta los barrios de Puentes Grandes, Tulipán y parte alta del Vedado (1910).
- Tubería de 450 milímetros para abastecer a Luyanó (1910).
- Tubería de 500 milímetros para abastecer La Víbora y Loma del Maso (1910).
- Conductores norte y sur (650-500 milímetros) del Sistema de Planta de Filtros.

Las redes de distribución más afectadas por filtraciones son las correspondientes al sistema central (por su antigüedad), aunque en general en todos los sistemas se presentan importantes pérdidas que coexisten con fugas significativas en el interior de las viviendas.

Considerando esta situación se decidió, a fines de la década de los ochenta, introducir en La Habana la tecnología ZMA de rehabilitación de redes de agua potable, desarrollada en la antigua República Democrática Alemana (RDA) y basada en la inyección de una pasta de cemento y agua. Además de las ventajas del mercado, un factor que motivó la selección de dicha tecnología es que la producción nacional de cemento podría satisfacer los requerimientos de su aplicación, disminuyendo los costos con respecto a otras variantes.

Ante la ausencia de estudios generales de caudal y presión en las redes de distribución, para fundamentar el área en la cual se iniciaría la aplicación de la tecnología, se consideró que los factores fundamentales para sustentar esa decisión eran las siguientes: la edad de las tuberías que integraban las redes de distribución y el grado de corrosión, así como evidencias de presiones insuficientes y fugas. Una de las zonas cuyas redes estaba más afectada por estos problemas era el norte del Vedado, en el centro de la ciudad, ya que las tuberías que las constituyen son muy antiguas, de hierro fundido, y estaban afectadas intensamente por la corrosión debido a la cercanía del litoral. En septiembre de 1989 se inició en esta zona un programa de ahorro de agua, cuyo centro estuvo constituido por la rehabilitación usando tecnología ZMA de sus redes de distribución.

En esta tecnología sin zanjas, después de cortar y limpiar mecánica e hidráulicamente cada tramo de tubería, se inserta en ellos una manguera o manga infla-

ble que hace la función de encofrado neumático y que se centra por un sistema de espaciadores. Los extremos del tramo se cierran con unas piezas especiales y se inyecta a presión una pasta de cemento y agua en el espacio anular que queda entre el tubo y la manguera, sellándose así las fugas en todas las uniones y las producidas por la corrosión o por cualquier otra causa. Cuando fragua la pasta de agua y cemento se extrae el aire de la manguera y se retira, quedando el tramo rehabilitado. Esta tecnología es aplicable para tuberías de 100 a 300 milímetros, y el espesor de la capa de revestimiento es de siete a diez milímetros. Con esta tecnología se rehabilitaron unos 25 kilómetros de redes en el Vedado a partir de 1989 (Pérez Monteagudo, 1990, 1998).

El principio básico que se siguió en la aplicación fue el de organizar la rehabilitación por circuitos, que a su vez pertenecieran a una misma fuente de abasto, en vez de tuberías aisladas de diferentes circuitos. Esto permitió maximizar los beneficios relativos al ahorro de agua. Por ejemplo, en la ya citada zona del Vedado (Pérez Monteagudo, 1990), después de rehabilitar solamente 4.3 kilómetros de redes en el área norte, se pudo suministrar agua a una zona que hacía veinte años que no la recibía a través de las redes, ahorrándose 1,500 viajes anuales de carro cisterna, con los consiguientes beneficios sociales y económicos.

Un cuidadoso registro de los costos incurridos en la aplicación de la tecnología ZMA en La Habana demostró que estuvieron en un rango de 41 a un 55% del costo de las técnicas tradicionales de reemplazo (Pérez Monteagudo, 1990), lo cual coincide con los rangos internacionales antes citados de la correcta aplicación de las tecnologías de rehabilitación sin zanja.

Como la tecnología ZMA estaba limitada a un diámetro máximo de 300 milímetros, no se pudo considerar en este primer programa la rehabilitación de diámetros mayores, pero en 1995 se logró rehabilitar una conductora de 600 milímetros de asbesto cemento aplicando resinas directamente en todas las juntas, pues estaban muy deterioradas.

El proyecto de rehabilitación más importante que se ejecuta actualmente es el del canal de Albear. El acueducto de Albear es uno de los más importantes de La Habana y conduce hasta ella unos 170,000 metros cúbicos al día, lo que representa un 15% del total bombeado. Es el único de los grandes acueductos de la ciudad de La Habana que funciona por gravedad, lo que tiene un valor económico de trascendencia. Por ejemplo, bombear esa misma cantidad de agua desde el campo de pozos El Gato pudiera costar 2.11 millones de dólares anuales en electricidad. Su primera etapa fue inaugurada en 1878 y el sistema completo,

en 1893. El proyecto y su construcción constituyen una de las obras hidráulicas más relevantes realizadas en la América hispana durante el periodo colonial.

Es un canal revestido y cubierto de una longitud de 9.6 kilómetros. Su sección es oval, de 2.4 metros de alto por 1.98 metros de ancho, con una pendiente de 1/5,000 con la cual se garantiza la llegada del agua por gravedad. No obstante las extremadas previsiones y la calidad del proyecto y la ejecución, se ha visto afectado por asentamientos naturales en su paso por terrenos arcillosos, compresibles y saturados por las aguas superficiales, lo que ha producido hendiduras y desperfectos, fundamentalmente en la corona del conducto, por donde han penetrado las raíces de árboles y arbustos, además de las aguas superficiales del terreno, lo que fue detectado en unos cuatro kilómetros del canal, en inspecciones realizadas en 1976 y 1992. No obstante, no hay peligro en su estabilidad estructural.

La primera variante que se estudió para enfrentar la rehabilitación del canal fue el uso de la tecnología Insituform (1997), y que demostró ser la más conveniente, pero dificultades financieras y de mercado impidieron su uso. Se analizaron entonces otras variantes, tales como revestir el canal con dovelas prefabricadas de hormigón armado o con hormigón lanzado. Sin embargo, la que finalmente se ha decidido aplicar consiste en una estabilización del terreno tras el revestimiento del canal, inyectando resinas especiales, y limpiando y reparando el interior del revestimiento, tomando en cuenta el reforzamiento estructural en algunos sectores. Las dimensiones del canal posibilitan el trabajo humano en su interior.

En 1995 se presentó una propuesta preliminar para un programa general de rehabilitación del sistema de distribución de agua potable de La Habana (Pérez Monteagudo *et al.*, 1995). El objetivo de este programa era reducir un 30% del volumen total bombeado en 15 años. Como se observa en el cuadro 1, los costos del primer año de implantación del programa se calcularon en 3.7 millones de dólares, los que se reducían a 2.4 en el segundo. A partir de ese año se calculó que se incrementaban paulatinamente hasta alcanzar 3.45 millones de dólares en el octavo año, valor que se mantenía estable durante todos los años hasta el último. Los beneficios anuales calculados significaban sólo 0.81 millones de dólares en el primero, pero estos valores crecieron establemente hasta alcanzar 3.58 millones en el séptimo. A partir de ese año, el incremento de los valores calculados de los beneficios anuales era sostenido hasta obtenerse 6.62 millones de dólares en el último año. Los beneficios energéticos estimados como consecuencia del ahorro de energía eléctrica, producto solamente de la disminución del

caudal bombeado en ese último año, ascendían a 4.94 millones de dólares, lo que era un indicador de la importancia de los beneficios. Obsérvese que ya en el séptimo año los beneficios anuales calculados eran ligeramente superiores a los costos anuales del programa y que los beneficios calculados para el último año del programa prácticamente duplicaban los costos estimados. Considerando estos factores se obtuvo una tasa de rentabilidad interna (valor de r que iguala la suma de los valores actuales de los costos con la de los valores actuales de los beneficios) de un 10%.

El análisis de la experiencia de la rehabilitación de las redes en la La Habana, así como la preparación y discusión de este programa sirvió de base para concebir la metodología presentada en este trabajo y profundizar en la forma de considerar algunos beneficios que no pudieron incluirse, como los relativos al incremento de la capacidad hidráulica.

Metodología recomendada para el cálculo de los beneficios de un programa de rehabilitación de redes y para fundamentar la decisión de la estrategia a aplicar

Un aspecto fundamental para lograr este propósito es tener en cuenta que los beneficios de un programa de rehabilitación se maximizan si se aplican de forma

concentrada en las tuberías dañadas de un mismo circuito y en los circuitos que componen la red de abasto, lo que fue ratificado por la experiencia de la ciudad de La Habana, como ya se expresó (Pérez Monteagudo, 1990, 1998).

Por ello se recomienda en el presente trabajo que se calculen los beneficios con el apoyo de programas de diseño o simulación de redes de distribución, ya que permiten una evaluación del efecto global.

El programa *ROKO*, desarrollado por Chiong y Martínez (1995), tiene la ventaja que determina la red de costo mínimo, teniendo en cuenta los costos de inversión y de energía. Con el auxilio de *ROKO* se pueden comparar distintas variantes de esquemas de rehabilitación de una red de distribución de agua potable y calcular sus beneficios diferenciales desde el punto de vista energético. Los esquemas pueden considerar la instalación de tuberías paralelas en ciertos tramos en los que se considere necesario ampliar el diámetro, pues el programa lo permite. Es conveniente destacar que el propósito de ampliar el diámetro se puede lograr también con las ya citadas técnicas que rompen la tubería antigua e insertan una nueva de mayor diámetro (Cabrera *et al.*, 1996), como la conocida como "Pipe Bursting" (1995). Posteriormente se puede valorar el resto de los beneficios diferenciales y decidir sobre el esquema más conveniente.

Cuadro 1. Programa de rehabilitación en La Habana. Análisis de costo-beneficio.

Año	Costos (MM dólares)	Valor actual Costos ($r = 10\%$)	Ahorro de agua por cada año (%)	Beneficios (MM dólares)	Valor actual. Beneficios ($r = 10\%$)
1	3.7	3.36	4	0.81	0.736
2	2.4	1.98	3	1.42	1.17
3	2.3	1.73	2	1.86	1.4
4	3.2	2.22	2	2.3	1.57
5	3.2	1.98	2	2.72	1.69
6	3.4	1.92	2	3.16	1.784
7	3.53	1.81	2	3.58	1.84
8	3.45	1.6	2	4.02	1.88
9	3.45	1.46	2	4.45	1.89
10	3.45	1.33	2	4.88	1.88
11	3.45	1.2	2	5.32	1.86
12	3.45	1.1	1.5	5.66	1.80
13	3.45	0.99	1.5	6.00	1.70
14	3.45	0.91	1.0	6.26	1.648
15	3.45	0.83	1.0	6.62	1.58
Total		24.42	30.0		24.42

Se propone seguir los pasos siguientes:

- Ejecutar *ROKO* o cualquier otro modelo matemático similar, con los valores de C , D o k (ecuación 2) de las tuberías afectadas antes de rehabilitar, así como con los caudales excesivos que circulan antes de la rehabilitación. Este análisis sirve de base para la comparación y determinación de los beneficios diferenciales energéticos. Los valores de C , D o k deben obtenerse preferiblemente de mediciones en la red, la igual que los caudales. En caso de no tener esta información es conveniente al menos realizar estimaciones, para lo cual Walski (1984) presenta gráficos que permiten pronosticar los incrementos de las rugosidades y las disminuciones de C al producirse el envejecimiento de tuberías afectadas por la corrosión.
- Ejecutar el programa con los valores estimados de C y diámetros interiores correspondientes a los tramos después de rehabilitar, para cada uno de los esquemas que se compararán. La estimación de los valores de C puede hacerse con gran precisión, pues los fabricantes de las tecnologías de rehabilitación en general suministran esos datos, que dependen del material usado para el revestimiento interior y que coincide con los correspondientes a tuberías nuevas fabricadas de dichos materiales. El diámetro interior también depende de la tecnología de rehabilitación. En estas ejecuciones del programa se pueden considerar los caudales que se estima circularán por cada tramo, como consecuencia de los ahorros estimados por la rehabilitación. Se pueden medir estos caudales una vez realizado el proceso de rehabilitación, para así ajustar los resultados. Restando los costos de energía correspondientes a los distintos esquemas propuestos al del esquema sin rehabilitar, se puede obtener el beneficio diferencial de cada uno, producto del incremento de la capacidad de transporte de la tubería (es decir, del incremento del diámetro interior y de la C) y de la disminución del caudal en la red.
- Los costos de rehabilitación y del reemplazo en caso de la instalación de una tubería paralela se pueden estimar por las ecuaciones 8 y 9, e incluirlas como costos unitarios en los datos del programa tanto en el esquema sin rehabilitar como en las variantes analizadas, y calcular el beneficio económico diferencial debido al menor costo de la rehabilitación respecto al reemplazo. Estos cálculos, por su sencillez, pueden realizarse de modo directo.
- El resto de los beneficios económicos diferenciales se puede estimar de acuerdo con lo propuesto anteriormente, ajustándose a las características de

los esquemas comparados y adicionándolos a los anteriores.

- A cada uno de los esquemas se le puede calcular el *valor capital* de la inversión, que implican (Vela *et al.*, 1994), según la ecuación:

$$VC = -I + \sum_{j=1}^n \frac{B_j}{(1+r')^j} \quad (11)$$

Los esquemas seleccionados serán aquellos que tengan VC positivo y de entre ellos se escogerá el más efectivo. El cálculo de I debe hacerse considerando los costos de la rehabilitación o el reemplazo (si se coloca tubería paralela y no se rehabilita por "Pipe Bursting", 1995). Para el caso de reemplazo en B_j no se consideraría el beneficio diferencial reflejado en la ecuación 10.

También se puede realizar la selección a partir del criterio de rentabilidad interna de cada una, determinando el valor de r , que anula el *valor capital* de la inversión, es decir $VC = 0$, resolviendo la ecuación correspondiente y obteniendo la tasa interna de rentabilidad de cada uno de los esquemas comparados.

Conclusiones

Como se evidencia de lo expuesto anteriormente, un programa de rehabilitación de agua debe y puede fundamentarse económicamente, considerando todos los beneficios que se obtienen de su aplicación. En la literatura del tema estos beneficios se toman en cuenta de forma parcial por los distintos autores. En el presente trabajo se logra incluir en un solo cuerpo integral la mayoría de ellos y se establece, además, su relación.

Es importante destacar que los beneficios energéticos definidos en este trabajo retoman el efecto conjunto del incremento de C y D en el aumento de la capacidad hidráulica y no solamente el del aumento de C (como hasta este momento). A su vez, permiten valorar también de manera integrada este efecto con el de la disminución del caudal, que se refleja (además de la disminución de las pérdidas por fricción, el efecto valorado habitualmente) en la reducción directa de la potencia tanto por el hecho de que las pérdidas ya disminuidas se multiplican por un caudal menor como porque la potencia decrece también en proporción directa del producto del caudal ahorrado por la diferencia de nivel contra la cual se bombea. Este último factor resalta la importancia del ahorro de agua en ciudades en las que deben salvarse desniveles importantes para distribuirla.

La integralidad del enfoque propuesto se avala además porque se valoran globalmente los beneficios

producidos por el uso del agua ahorrada en otros propósitos y por la metodología propuesta, que se basa en la valoración de los beneficios en toda la red y no solamente en tuberías aisladas.

Recibido: 22/11/1999

Aprobado: 14/04/2000

Referencias

- Aqua-Pigs*, catálogo comercial publicado por Girard Industries, Inc., Houston, Texas, 1996, 23 pp.
- AWWA, *Water main evaluation for rehabilitation/replacement*, AWWA Research Foundation, Denver, Colorado, 1986, 182 pp.
- Bathia, R. *et al.*, *Water conservation and reallocation: best practice cases in improving economic efficiency and environmental quality*, Water and Sanitation Currents, UNDP-World Bank, Water & Sanitation Program, Washington, D.C., 1995, 102 pp.
- Cabrera, E. *et al.*, "Network maintenance through analysis of the cost of water", *Journal of the American Water Works Association*, vol. 87: 1995, pp. 86-98.
- Cabrera, E. *et al.* (editores), "La rehabilitación de los sistemas de distribución de agua", *Ingeniería Hidráulica Aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua*, vol. II, U.D. Mecánica de Fluidos, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 1996, pp. 1078-1082.
- Chiong, C. y Martínez, J. B. (1995). Manual de Usuario del Sistema ROKO, Módulo ROCT, Diseño de Redes de Abastecimiento de Agua. Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría", Centro de Investigaciones Hidráulicas, Ciudad de La Habana, Cuba. Octubre. 18 p.
- Insituform*, catálogo comercial publicado por Insituform Technologies Inc., Memphis, Tennessee, 1997, 18 pp.
- Pipe Bursting*, catálogo comercial publicado por Payton/Stephenson Marketing Communications, Houston, Texas, 1995, 7 pp.
- Pérez Monteagudo, F., "Aplicación de un programa integral de rehabilitación de redes de acueducto en la ciudad de La Habana", *Memorias del XIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, vol 2, Comité Regional Latinoamericano de la Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas, Montevideo, Uruguay, del 6 al 10 de noviembre de 1990, pp. 1057-1072.
- Pérez Monteagudo, F. *et al.*, "Programa de rehabilitación del sistema de distribución de agua de la ciudad de La Habana", *Memorias del Taller Internacional de Agua y Saneamiento Ambiental de la Ciudad de La Habana*, Grupo de Desarrollo Integral de la Capital, conjuntamente con el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, los programas de agua y saneamiento, y gestión urbana del PNUD-Banco Mundial, UNICEF y los gobiernos de Suiza y Canadá, La Habana, Cuba, del 30 de enero al 4 de febrero de 1995, pp. 120-132.
- Pérez Monteagudo, F., *Nuevos métodos de construcción, mantenimiento, limpieza y rehabilitación de redes hidráulicas*, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, noviembre de 1998, 50 pp.
- Spiniello Construction Company, *Pipeline rehabilitation by cleaning and cement-mortar in place*, catálogo comercial publicado por Spiniello Construction Company, Nueva Jersey, 1996, 6 pp.
- Vela, A. *et al.*, "Estrategias óptimas para la reducción de las pérdidas de agua en sistemas de abastecimiento", *Ingeniería del Agua*, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1994, vol. 1, pp. 35-54.
- Walski, T.M., "Providing and restoring carrying capacity", *Analysis of Water Distribution Systems*, Van Nostrand Reinhold, Nueva York, 1984, pp. 149-177.

Abstract

Pérez Monteagudo, F., "Economical benefits of the rehabilitation of water distribution networks", Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish), vol. XVI, num. 2, pages 43-55, April-June, 2001.

Rehabilitation of water distribution networks is generally considered as an option to enhance the quality of the Water Utility services, when in those systems there are important hydraulic and structural deficiencies that can also imply problems with water quality. The decision to rehabilitate can be supported by demonstrating the important economical benefits derived from it and that are often partially and insufficiently considered. Rehabilitation decision-making has also been based on social impact of works. Furthermore, the general trend has been to analyze the economical benefits of the rehabilitation of isolated pipes rather than the global effect over the whole network. The necessity of a thorough and comprehensive analysis of all the benefits derived from rehabilitating water distribution systems is established in this paper. Such analysis considers the effects over the entire network, and is based upon the experience of several years of rehabilitation of Havana's water distribution network. Consequently, a methodology is developed.

Key words: *rehabilitation, water distribution networks, pipes, economical benefits, water resources, trenchless technologies, energy savings, head losses.*

Dirección institucional del autor:

Fernando Pérez Monteagudo

Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría"
Centro de Investigaciones Hidráulicas, La Habana, Cuba