

Factores de fiabilidad y eficiencia en la toma de decisiones para la rehabilitación de tuberías

Reliability and Efficiency Factors in Decision Making for Rehabilitation of Pipelines

Alonso-Guzmán Carlos Daniel

*Departamento de Mecánica de Fluidos
Instituto Tecnológico de Parral, Chihuahua
Correo: cardan85@hotmail.com*

Izquierdo-Sebastian Joaquín

*Instituto de Matemática Multidisciplinar, Grupo FluIng
Universidad Politécnica de Valencia, España
Correo: jizquier@upv.es*

Pérez-García Rafael

*Instituto de Matemática Multidisciplinar, Grupo FluIng
Universidad Politécnica de Valencia, España
Correo: rperez@upv.es*

Herrera-Fernández Manuel

*Instituto de Matemática Multidisciplinar, Grupo FluIng
Universidad Politécnica de Valencia, España
Correo: mherrera@upv.es*

Información del artículo: recibido: junio de 2011, aceptado: enero de 2013

Resumen

La metodología que se ha desarrollado propone una secuencia de rehabilitaciones en la red de distribución de agua, identificando jerárquicamente los grupos de tuberías que deben ser objeto de renovación, tomando en consideración todos los factores asociados tanto endógenos como exógenos y las limitaciones técnicas en el funcionamiento de la red de agua, considerando los presupuestos anuales disponibles para la rehabilitación de tuberías. El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo para facilitar la toma de decisiones de los gestores en las redes de abastecimiento, considerando una restricción presupuestal, qué cantidad de metros lineales de cada grupo de tuberías proporciona un máximo beneficio con relación a la valoración de los factores de influencia, de los beneficios obtenidos y el costo de la rehabilitación. Para lograr esto utilizaremos la herramienta de algoritmos genéticos a través de Evolver y lógica difusa, la utilización de EPANET para determinar el costo del "ahorro" de la energía eléctrica y del caudal recuperado de las fugas. Dicho modelo se aplicará a un caso de estudio en la ciudad de Celaya, Guanajuato, México.

Descriptor:

- red de distribución
- renovación
- jerarquización
- toma de decisiones
- restricción presupuestal

Abstract

The methodology that has been developed suggests a sequence of interventions in the water distribution network, identifying the hierarchy of groups of pipes that must be renewed, taking into consideration all the factors associated, both endogenous and exogenous, and the technical limitations in the functioning of the water network considering the annual budget available for the rehabilitation of pipelines. The aim of this work is to develop a model to facilitate the decision-making to the managers of water distribution systems, considering a budget constraint, the amount of linear meters of each group of pipes that provides a maximum benefit in relation to the valuation of influence factors, the benefits and the cost of the rehabilitation. To accomplish this, we use the genetic algorithms tool through Evolver and fuzzy logic, using EPANET to determine the cost of "saving" electricity and the recovered leakage flow. This model is applied to a case study in the city of Celaya, Guanajuato, Mexico.

Keywords:

- water distribution network
- renewal
- hierarchy
- decision-making
- budget constraint

Introducción

Para los gestores de sistemas de abastecimiento de agua que operan y toman decisiones respecto al sistema, identifica factores que influyen en la determinación de prioridades en la renovación de las tuberías no es tarea sencilla, dado que la selección debe apoyarse, en primera instancia, en la identificación de aquellos criterios fundamentales a la hora de seleccionar la tubería que debe ser considerados prioritarios para su renovación (Alonso *et al.*, 2008) aunado a la disponibilidad de los recursos financieros requeridos y los recursos financieros disponibles para las empresas que operan los sistemas de abastecimiento de agua. El objetivo es mejorar la fiabilidad y el funcionamiento de la red.

Se pretende conformar un modelo que nos permita decidir, con base en una restricción presupuestal, qué cantidad de metros lineales de cada grupo de tuberías analizadas nos proporciona un mayor beneficio, según la valoración de los factores de influencia, el costo de rehabilitación y de los beneficios obtenidos con la misma. Para esto, utilizaremos la herramienta de algoritmos genéticos a través del método "recipiente" del software Evolver para determinar el ahorro de la energía eléctrica y del caudal recuperado de las fugas al rehabilitar las tuberías, también se utiliza el software Epanet para el análisis de redes hidráulicas. Dicho modelo se aplica a un caso de estudio.

Desarrollo del modelo

El caso de estudio se realiza para ocho grupos de tuberías de la red de abastecimiento de la ciudad de Celaya, Guanajuato, donde se cuenta con una restricción presupuestal de 270,000 dólares anuales, monto disponible

en el programa de rehabilitación de tuberías por parte del organismo operador. Por lo tanto, la función objetivo es:

$$\text{Max} \sum_{i=1}^n X_i (B_i - C_i) \quad (1)$$

sujeta a

$$\sum_{i=1}^n X_i (C_s) \leq 270,000, \text{ dólares} \quad (2)$$

$$X_i \geq 500, \quad X_i \geq 0 \quad (3)$$

donde

X_i es la cantidad de metros lineales de tubería,
 B_i se refiere a los beneficios totales,
 C_i a los costos totales,
 C_s a los costos de sustitución.

Para determinar los costos se cuenta con los costos unitarios de rehabilitación para cada grupo de tubería, así como los valores de factores de influencia de cada uno de ellos, como se muestra en la tabla 1.

Con la valoración de los factores de influencia y con el costo de rehabilitación unitario se calcula el factor del costo, la tabla 2 muestra el costo total del factor de costo, en donde la primera columna se refiere al costo de rehabilitación por metro lineal para cada uno de los grupos de tuberías, en la segunda columna el factor de costo, que es el resultado del costo unitario dividido entre la suma de los valores de los factores influencia de la tabla 1. La columna tres se refiere a los metros lineales

Tabla 1. Concentrado de valores de los factores de influencia

ID Línea	Edad Per. Inst.	Historial fugas	Perdida capacidad	IDN	IIQ _{fuga}	Tiempo renovación	Influencia rotura Q	Impacto medio amb.	Total
AC (A1)	6.40	10.00	3.98	4.10	0.00	7.19	3.26	6.00	40.93
AC (A2)	3.60	9.19	4.64	5.80	2.45	0.00	3.04	4.80	33.52
FoFo (C1)	10.00	8.36	5.02	5.20	0.55	6.33	4.46	4.80	44.72
Fo Ga (C1)	10.00	9.25	4.73	4.60	4.62	3.85	4.57	10.00	51.62
Fo Ga (C2)	6.40	9.92	4.10	5.50	3.72	10.00	4.10	4.20	47.94
PVC30	3.60	6.78	4.92	3.60	3.24	0.00	0.12	6.00	28.26
PVC20	1.60	7.26	4.27	5.50	10.00	0.00	1.76	0.00	30.39
Polietileno	0.40	9.10	2.86	10.0	2.23	0.00	1.12	0.00	25.71

ID	Edad tubería (años)	Costo \$/ML	Factor	m.l (a modificar)	Costo total
AC (A1)	40	\$477	11.65	12605	\$6,012,585.00
AC (A2)	30	\$537	16.02	7243	\$3,889,491.00
FoFo (C1)	50	\$594	13.28	11613	\$6,898,122.00
Fo Ga (C1)	50	\$550	10.65	8600	\$4,730,000.00
Fo Ga (C2)	40	\$480	10.01	7540	\$3,619,200.00
PVC30	30	\$491	17.37	25201	\$12,373,691.00
PVC20	20	\$471	15.50	11548	\$5,439,108.00
Polietileno	20	\$480	18.67	13865	\$6,655,200.00
				Total	\$49,617,397.00

Tabla 2. Factor de costo, longitudes totales y costo total

de cada grupo de tuberías, la cuarta columna contiene los metros lineales a modificar y que maximizan los beneficios cumpliendo con las restricciones. Como se observa, para rehabilitar la longitud total de los ocho grupos de tuberías se requieren aproximadamente 3,846,153 dólares, pero sólo se disponen de 270,000 dólares anuales.

Los beneficios logrados por el "ahorro" de la energía al rehabilitar las tuberías, es decir, lo que se consume de energía en "alimentar" las fugas, se determina simulando tres escenarios de operación de las redes de abastecimiento para cada grupo de tuberías mediante Epanet. Para cada grupo de tuberías en Epanet, los tres escenarios planteados son: la red operando con una eficiencia de 85%, red en el estado que se encuentra actualmente, y en el último se aplica la curva de bombeo original, pero con la red en el estado en que se encuentra actualmente. A continuación se ilustra con un ejemplo el procedimiento para determinar el beneficio del ahorro de la energía, de uno de los sectores (sector San Juanico).

En la figura 1 se muestra la presión nodal simulada con la red a 85% de eficiencia, que es el nivel deseado y con el cual se realiza el cálculo. En la figura 2 se muestra

la presión nodal del estado actual de la red, que incluye las fugas. El caudal total a través de la red, es igual a la demanda total diaria de 1381.61m³ y todas las presiones nodales tienen por lo menos 10 mca.

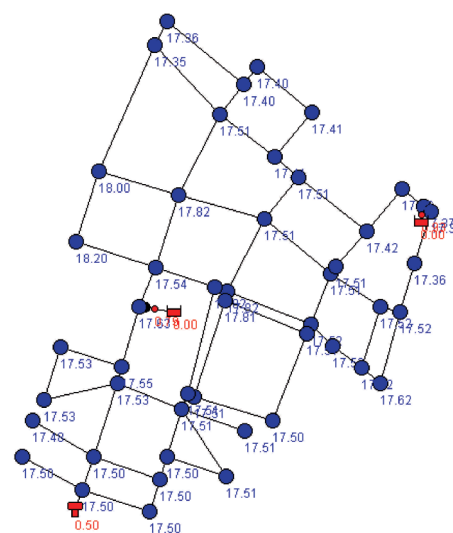


Figura 1. Presión nodal con 85% de eficiencia en la red

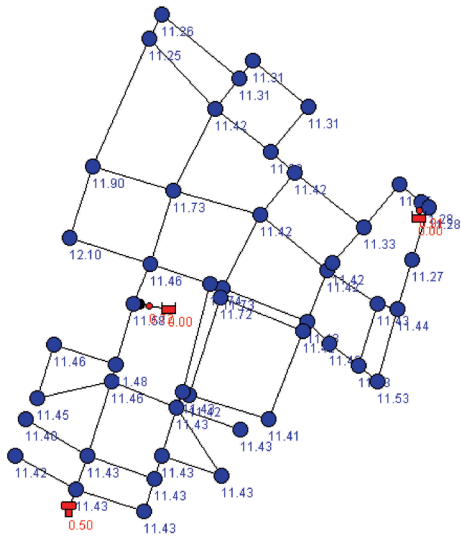


Figura 2. Presión nodal, estado actual de la red

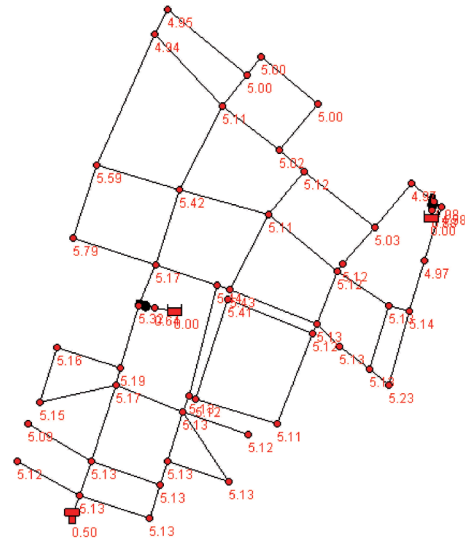


Figura 3. Caída de presión en la red, aplicando curva de bombeo original

Cuando las fugas en los nodos tienen asociado un coeficiente de emisor para representar el escenario actual y la curva original de las estaciones de bombeo, se aplica (Colombo y Kerney, 2002) el caudal total a través del sistema y dicho caudal se incrementa a 18.82 lps., mientras que todos los requisitos de la demanda se cumplen, pero la presión cae significativamente como se muestra en la figura 3. A pesar de que la satisfacción de las demandas nodales es un requisito típico del modelado (Le Gauffre *et al.*, 2002a), en compensación para las fugas, la magnitud de las pérdidas aumenta, hasta que el volumen del sistema se convierte en 21.80 lps., y cumple con las presiones nodales mínimas; el adicional de 2.98 lps., está asociado con la presión que depende de la demanda ejercida por las fugas y por consiguiente la energía aplicada para “alimentar las fugas”.

Epanet calcula el costo de la energía para los diferentes escenarios. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 3.

Cálculo del caudal fugado

El procedimiento para determinar el caudal fugado es análogo al que se realizó para el cálculo del costo de la energía, con la diferencia de que ahora se realiza la comparación de los volúmenes demandados en las condiciones actuales en que se encuentra la red, versus los volúmenes demandados por la red con un 85% de eficiencia. El resultado de la comparación del balance de masa de cada uno de los escenarios (tabla 4), se multiplica por el precio promedio del costo del m³ de agua.

Sector	Q _{85%} eficiencia costo día	Q sin cumplir presiones (a) costo día	Q cumpliendo presiones (b) costo día	Diferencia b-a
AC (A1)	\$621.31	\$875.00	\$1,231.00	\$356.00
AC (A2)	\$701.24	\$1,023.22	\$1,424.22	\$401.00
FoFo (C1)	\$567.30	\$831.31	\$1,214.31	\$383.00
Fo Ga (C1)	\$444.65	\$630.54	\$1,008.54	\$378.00
Fo Ga (C2)	\$678.95	\$944.22	\$1,345.22	\$401.00
PVC30	\$1,388.42	\$2,019.41	\$2,496.41	\$477.00
PVC20	\$538.26	\$787.19	\$1,191.19	\$404.00
Polietileno	\$174.84	\$259.51	\$504.51	\$245.00

Tabla 3. Costo diario de la energía para los diferentes escenarios planteados

Sector	Q _{85%} eficiencia lps	Q sin cumplir Presiones (a)	Q cumpliendo Presiones(b)	Diferencia b-a
AC (A1)	13.44	1559.18	1908.06	348.88
AC (A2)	13.48	1379.95	1788.97	409.02
FoFo (C1)	9.83	1129.18	1506.05	376.87
Fo Ga (C1)	10.63	1138.71	1511.04	372.33
Fo Ga (C2)	48.55	4538.44	4904.06	365.62
PVC30	54.38	5473.63	5934.89	461.26
PVC20	37.84	3975.66	4375.62	399.96
Polietileno	15.99	1626.41	1883.66	257.25

Tabla 4. Caudales diarios para los tres escenarios planteados

Cálculo del riesgo de la consecuencia de fallo

Es necesario calcular el costo, antes de que se presente un fallo, del riesgo de la consecuencia de fallo por no rehabilitar la tubería, de tal manera que se supone que al rehabilitar la tubería evitaremos el fallo y su posible consecuencia en el entorno (Nafi, 2006), lo cual se considera como un beneficio, dentro de los beneficios en la función objetivo. Para considerar como beneficio la inversión en la rehabilitación de las tuberías, se seleccionan tuberías con nivel de riesgo alto y nivel de consecuencia importante. La clasificación para la determi-

nación de las consecuencias de riesgo se realiza mediante las escalas cualitativas (Werey, 2003), con base en la importancia de los factores y de su densidad en las tuberías; por ejemplo, para las tuberías donde se localice al menos un punto "neurálgico", como edificios de dimensiones importantes próximos a las tuberías o vialidades importantes. Se asigna al punto más elevado en la escala de esa clasificación y así sucesivamente, según el grado de importancia del factor, como muestra en la tabla 5.

De acuerdo con lo descrito, se aplica al caso de estudio y se obtienen los resultados mostrados en la tabla 6.

Puntos neurálgicos	Edificios	Vialidades importantes	Clasificación
1	1	1	Absolutamente importante
1	1	0	Extremadamente importante
1	0	1	Completamente importante
0	1	1	Completamente importante
0	0	1	Importante
0	1	0	Importante
1	0	0	Importante
0	0	0	Absolutamente sin importancia

Tabla 5. Escala cualitativa de las consecuencias de riesgo

Tabla 6. Resultados de la clasificación de las consecuencias de riesgo

ID	Puntos neurálgicos 38,461 dólares	Edificios 61,538 dólares	Vialidades importantes 32,307 dólares	Escala cualitativa
AC (A1)	0	0	0	Absolutamente sin importancia
AC (A2)	0	1	0	Importante
FoFo (C1)	0	0	0	Absolutamente sin importancia
Fo Ga (C1)	0	0	0	Absolutamente sin importancia
Fo Ga (C2)	1	1	0	Extremadamente importante
PVC30	1	0	1	Completamente importante
PVC20	0	0	0	Absolutamente sin importancia
Polietileno	0	0	1	Importante

Tabla 7. Concentrado del cálculo de la probabilidad de fallo

ID	Tipo del material			Presión hidrostática			Edad de la tubería			Historial de fugas			Medio ambiente			Tipo de unión			Continuidad en la operación			Σ
	W	K	$P=F_1*W_1$	W	K	$P=F_1*W_1$	W	K	$P=F_1*W_1$	W	K	$P=F_1*W_1$	W	K	$P=F_1*W_1$	W	K	$P=F_1*W_1$	W	K	$P=F_1*W_1$	
0.1	0.2	0.02	0.1	0.2	0.01	0.2	0.2	0.03	0.2	0.4	0.06	0.1	0.6	0.06	0.1	0.4	0.02	0.1	0.2	0.02	0.22	
0.1	0.4	0.04	0.1	0.4	0.04	0.2	0.4	0.06	0.2	0.4	0.08	0.1	0.4	0.04	0.1	0.2	0.02	0.1	0.2	0.02	0.30	
0.2	0.2	0.03	0.1	0.2	0.02	0.2	0.6	0.12	0.1	0.2	0.02	0.2	0.2	0.03	0.2	0.2	0.03	0.1	0.4	0.02	0.27	
0.3	0.6	0.15	0.1	0.2	0.02	0.2	0.4	0.06	0.1	0.4	0.04	0.2	0.2	0.03	0.2	0.2	0.03	0.1	0.6	0.02	0.35	
0.3	0.4	0.10	0.2	0.4	0.06	0.2	0.2	0.04	0.2	0.2	0.04	0.2	0.4	0.06	0.2	0.2	0.03	0.1	0.6	0.02	0.35	
0.1	0.2	0.01	0.2	0.6	0.12	0.1	0.2	0.01	0.1	0.2	0.02	0.1	0.6	0.03	0.1	0.4	0.04	0.02	0.4	0.06	0.29	
0.1	0.2	0.01	0.2	0.4	0.08	0.1	0.2	0.01	0.1	0.4	0.04	0.1	0.2	0.02	0.1	0.2	0.01	0.02	0.2	0.04	0.21	
0.1	0.4	0.02	0.1	0.4	0.04	0.1	0.2	0.01	0.1	0.2	0.01	0.2	0.4	0.08	0.3	0.6	0.15	0.01	0.6	0.06	0.37	
1		0.38	1		0.39	1		0.34	1		0.31	1		0.35	1		0.33	1		0.26		

La probabilidad de fallo se calcula con la ecuación 4, donde se asigna un valor de probabilidad correspondiente a $K_1 = 1$, $K_2 = 0.8$, $K_3 = 0.6$, $K_4 = 0.4$, $K_5 = 0.2$. A cada grupo de tuberías se le asigna un valor según el criterio del evaluador y las características de cada grupo de tuberías (Dridi *et al.*, 2005). Para determinar la probabilidad de fallo se multiplica la probabilidad determinada por el valor del peso asignado; el resultado es la probabilidad de fallo como se muestra en la siguiente expresión

$$P = \sum_{i=1}^n (P_i * w_i) \quad (4)$$

Los factores considerados en la influencia de fallos son: tipo de material, presión hidrostática, edad de la tubería, historial de fugas, medio ambiente, tipo de unión y continuidad en la operación. Los resultados de la probabilidad de fallo para el grupo de tuberías del caso de estudio se muestran en la tabla 7.

La probabilidad de fallo para cada uno de los grupos de tuberías se obtienen de la tabla 7, una vez que se determina la probabilidad se realiza la siguiente clasificación para determinar la escala cualitativa de la probabilidad de riesgo. El rango de los cuartiles se determina de acuerdo con el rango de probabilidad total (Tuhovcak *et al.*, 2007); en nuestro caso, el rango es de 20 a 40, donde el rango de menor importancia en la clasificación es de 20-25, lo que se clasifica como alto, y así sucesivamente, hasta llegar a la clasificación de absolutamente alto que es el mayor valor del rango de

probabilidad. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 8.

Una vez que se tiene la clasificación y la valoración de las escalas cualitativas de la probabilidad de riesgo y la consecuencia de riesgo, se procede a la determinación del conjunto de números difusos (Mogolia *et al.*, 2006), donde se obtiene el riesgo de los números difusos triangulares (TFN_{ri}) para cada grupo de tuberías mostrado en la tabla 9. En la figura 4 se muestra el ejemplo de la estimación de cinco-tuplas de riesgo del conjunto difuso, en este caso para el grupo de tuberías de PVC 30 (tabla 10), donde el número difuso triangular de la probabilidad de fallo (TFN_r) es [0.7, 0.8, 0.9], dado que la probabilidad de riesgo es completamente alto y el número difuso triangular de la consecuencia de fallo (TFN_c) es [0.7, 0.8, 0.9], con la consecuencia de riesgo completamente importante.

Tabla 8. Clasificación de la probabilidad de fallo

ID	Probabilidad de fallo	Escala cualitativa
AC (A1)	0.22	Alto
AC (A2)	0.30	Completamente alto
FoFo (C1)	0.27	Completamente alto
Fo Ga (C1)	0.35	Extremadamente alto
Fo Ga (C2)	0.35	Extremadamente alto
PVC30	0.29	Completamente alto
PVC20	0.21	Alto
Polietileno alta densidad	0.37	Absolutamente alto

Tabla 9. Resultados de los números difusos triangulares

ID	Escala cualitativa de riesgo	Escala cualitativa de la consecuencia de riesgo	Números difusos triangulares					TFN _r x TFN _i			
AC (A1)	Alto	Abs. sin importancia									
AC (A2)	Comp. alto	Importante	0.7	0.8	0.9	0.6	0.7	0.8	0.42	0.56	0.72
FoFo (C1)	Comp. alto	Abs. sin importancia									
Fo Ga (C1)	Ext. alto	Abs. sin importancia									
Fo Ga (C2)	Ext. alto	Ext. importante	0.8	0.9	1	0.8	0.9	1	0.64	0.81	1
PVC30	Comp. alto	Completamente importante	0.7	0.8	0.9	0.7	0.8	0.9	0.49	0.64	0.81
PVC20	Alto	Abs. sin importancia									
Polietileno	Abs. alto	Importante	0.9	1	1	0.6	0.7	0.8	0.54	0.7	0.8

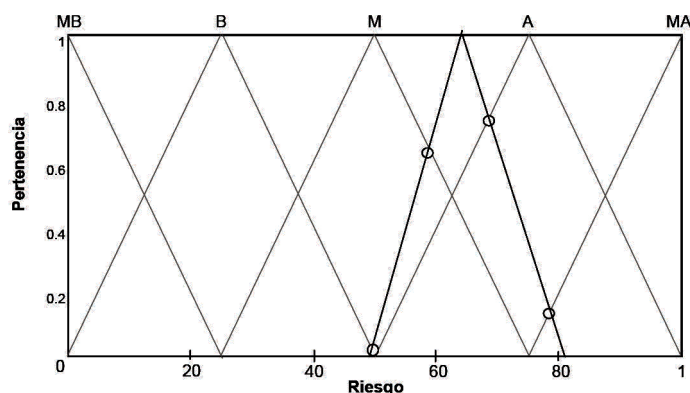


Figura 4. Estimación de cinco-tuplas de riesgo del conjunto difuso

Esto se obtiene de la tabla 10, donde se definen los números difusos triangulares para una probabilidad de riesgo completamente alto y una consecuencia de riesgo completamente importante. Al realizar la operación $(TFN_r * TFN_i)$, se obtiene el correspondiente $TFN_r \times TFN_i$ [0.49, 0.64, 0.81].

Una vez que se determina el TFN_{ri} , se realiza la conversión al riesgo difuso X normalizado de las cinco-tuplas del conjunto difuso (Kleiner y Adams, 2001), obteniendo el resultado del riesgo difuso X [0, 0, 0.42, 0.48, 0.10], donde tomamos la probabilidad más alta (muy alta en la escala del nivel de riesgo), que en este

caso es 0.16 (tabla 9); este valor se aplica para determinar el costo de la consecuencia de fallo, donde: MB (muy bajo), B (bajo), M (medio), A (alto), MA (muy alto).

Para la determinación del costo de la consecuencia de fallo para cada una de las tuberías, en la tabla 11 se concentra el grupo de tuberías con cada uno de los costos de las consecuencias de fallos, definidos previamente, en donde se asigna el porcentaje de la probabilidad de la consecuencia de fallo obtenida en el riesgo difuso X en la escala cualitativa más alta, considerando sólo los valores de las probabilidades de la escala cualitativa del nivel de riesgo muy alto.

$x = TFN_{ri} =$	[0.49, 0.64, 0.81]														
p	MB		B			M			A		MA				
TFN_L	0	0	0.25	0	0.25	0.5	0.25	0.5	0.75	0.5	0.75	1	0.75	1	1
Inferencia	0		0			0.65			0.75		0.16				
$X_L =$	[0, 0, 0.65, 0.75, 0.16] cardinalidad, C = 1.56														
$X =$	[0, 0, 0.42, 0.48, 0.10]														

Tabla 10. Estructura de la obtención del riesgo difuso

ID	Agencia de autos \$500,000.00	Edificios proximidad \$800,000.00	Vialidades importantes \$420,000.00	Costo consecuencia de fallo
AC (A1)	0	0	0	\$0.00
AC (A2)	0	0.27	0	\$216,000.00
FoFo (C1)	0	0	0	\$0.00
Fo Ga (C1)	0	0	0	\$0.00
Fo Ga (C2)	0.33	0.33	0	\$429,000.00
PVC30	0.1	0	0.1	\$92,000.00
PVC20	0	0	0	\$0.00
Polietileno	0	0	0.1	\$42,000.00

Tabla 11. Resultados del cálculo del costo de la consecuencia de fallo

Obtención de resultados

Los costos se determinan a partir del costo de rehabilitación unitario de cada grupo de tubería, por el factor de costo obtenido de la longitud total entre la valoración global en la suma de los factores de influencia. Los beneficios se muestran en la tabla 12.

El método de solución del Evolver es el método de solución "recipe", el método "recipe" funciona cuan-

do las variables a ajustar son independientes unas de otras. El procedimiento es similar a pesar que cada variable es la cantidad de ingrediente de un pastel, Evolver genera números para estas variables, con el objetivo de encontrar la mejor mezcla. Una vez que se ejecuta el modelo, se obtienen los resultados de la longitud óptima para cada grupo de tubería con la que se maximizan los beneficios. Los resultados se presentan en la tabla 13.

Tabla 12. Resultado y cálculo de los beneficio al rehabilitar las tuberías

ID Línea	BENEFICIOS							Total
	Ahorro energía \$/día	Ahorro Q_{fuga} m ³ /día	Costo \$/m ³	Subtotal	Riesgo	Riesgo/m.l	m.l (a modificar)	
AC (A1)	356	349	1.96	683.80	\$0.00	0.00	12605	\$1,039.80
AC (A2)	401	409	1.96	801.67	\$216,000	29.82	7243	\$1,232.50
FoFo (C1)	383	377	1.96	738.67	\$0.00	0.00	11613	\$1,121.67
Fo Ga (C1)	378	372	1.96	729.76	\$0.00	0.00	8600	\$1,107.77
Fo Ga (C2)	401	366	1.96	716.61	\$429,000	56.90	7540	\$1,174.51
PVC30	477	461	1.75	807.20	\$92,000	3.65	25201	\$1,287.85
PVC20	404	400	1.63	651.93	\$0.00	0.00	11548	\$1,055.93
Polietileno	245	257	1.63	419.31	\$42,000	3.03	13865	\$ 667.35

ID Línea	m.l	Costo total
AC (A1)	593.00	\$283,455.00
AC (A2)	1,250.00	\$671,843.00
FoFo (C1)	723.00	\$430,056.00
Fo Ga (C1)	1,198.00	\$659,494.00
Fo Ga (C2)	599.00	\$288,113.00
PVC30	750.00	\$368,844.00
PVC20	937.00	\$441,922.00
Polietileno	741.00	\$356,273.00
		\$3,500,000.00

Tabla 13. Resultados de la longitud óptima para cada grupo de tubería

Conclusiones

El aspecto económico es relevante y es un factor determinante para la toma de decisiones de los gestores en las empresas de agua, aunado a los costos y beneficios que se encuentran vinculados. De tal manera que se considera de gran ventaja contar con la opción de obtener longitudes de tubería a rehabilitar en cada sector para no enfocar y centrar su rehabilitación a sectores completos solamente. Los resultados muestran que la mayor longitud a rehabilitar es la que pertenece al grupo de las tuberías de asbesto, cemento de 50 años de edad, seguidas por las tuberías de fierro galvanizado de 40 años de edad. De tal manera, se concluye que el modelo desarrollado es una herramienta práctica y tangible para la toma de decisiones, proporcionando la longitud óptima de tubería que debe ser rehabilitada, objetivo primordial en toda empresa de agua, considerando los distintos factores de influencia en el deterioro de las tuberías, que a su vez, contribuyen a los fallos de las mismas ocasionando consecuencias considerables y afectando la fiabilidad en el sistema de distribución.

Referencias

- Alonso C., Pérez R., Izquierdo J., Montalvo I. Influencing Factors for Scheduling Optimal Pipeline Replacement with Budgetary Constraints, en: Proceedings of 7th International Conference Environmental Engineering, mayo de 2008, Vilnius, Lithuania, pp. 130-138.
- Colombo A.F. y Karney B.W. Energy and Costs of Leaky Pipes. *Toward Comprehensive Picture* (ASCE), volumen 128 (número 6), 2002: 441-450.
- Dridi L., Mialhot A., Parizeau M., Villeneuve J.P. A Strategy for Optimal Replacement of Water Pipes Integrating Structural and Hydraulic Indicators Based on a Statistical Water Pipe Break Model, en: Proceedings of the 8th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, septiembre de 2005, Londres, Inglaterra, pp. 56-70.
- Kleiner Y. y Adams R. Water Network Renewal Planning. *Journal of Computing in Civil Engineering*, volumen 15 (número 1), 2001: 29-42.

- Le Gauffre P., Baur R., Laffréchine K., Wery C., Torterotot J., Eisenbeis P. Elaboration de critères pour l'aide à la Construction des Programmes Annuels de Réhabilitation des Réseaux d'eau Potable, Toulouse, Francia, 2002.
- Mogolia M., Burn S., Meddings S. *Decision Support System for Water Pipeline Renewal Prioritisation*, CSIRO BCE, Melbourne, Australia, ITcon, Vol. 11, 2006, pp. 237-256.
- Nafi A.K. *La Programmation Pluriannuelle du Renouvellement des Réseaux d'eau Potable*. Thèse (Doctorat). Strasbourg France. Université Louis Pasteur. 2006. 174 p.
- Tuhovcak L. y Rucka J. Risk Analysis of Water Supply Project Water Republic. *Meeting Water Risk*, volumen 18 (número 3), 2007: 67-99.
- Wery C. *Politiques de Renouvellement des Réseaux d'eau Potable*. Thèse (Doctorat). Strasbourg France. Université Louis Pasteur. 2003. 162p.

Bibliografía

- Boxall J.B., O'Hagan A., Pooladsaz S., Saul A.J., Unwin D.M. Estimation of Burst Rates in Water Distribution Mains. *Water Management*, volumen 160 (número 2), 2007: 73-82.
- Dandy G.C. y Engelhardt M. Optimal Scheduling of Water Pipe Replacement Using Genetic Algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, volumen 127 (número 4), 2001: 214-223.
- Devi P.T. y Park N.S. Multiobjective Genetic Algorithm for Design of Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, volumen 130 (número 1), 2004: 73-82.
- Lai C.C. Unaccounted for Water and the Economics of Leak Detection. *Water Supply*, volumen 9 (número 4), 1991: 75-91.
- MacGillivray B.H., Hamilton P.D., Strutt J.E., Pollard S.J. Risk Analysis Strategies in the Water Utility Sector: An Inventory of Applications for Better and More Credible Decision Making. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, volumen 36 (número 2), 2006: 85-139.
- Mailhot A., Poulin A., Villeneuve J. Optimal Replacement of Water Pipes. *Water Resources Research*, volumen 39 (número 5), 2003: 1-13.
- Rossman L.A. *Epanet2 User Manual*. Water Supply and Water Resource Division of the US, Environmental Protection Agency, EPA, USA, 2000.

Este artículo se cita:

Citación estilo Chicago

Alonso-Guzmán, Carlos Daniel, Rafael Pérez-García, Joaquín Izquierdo-Sebastian, Manuel Herrera-Fernández. Factores de fiabilidad y eficiencia en la toma de decisiones para la rehabilitación de tuberías. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XIV, 04 (2013): 489-498.

Citación estilo ISO 690

Alonso-Guzmán C.D., Pérez-García R., Izquierdo-Sebastian J., Herrera-Fernández M. Factores de fiabilidad y eficiencia en la toma de decisiones para la rehabilitación de tuberías. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XIV (número 4), octubre-diciembre 2013: 489-498.

Semblanza de los autores

Carlos Daniel Alonso-Guzmán. Obtuvo la maestría en ingeniería hidráulica por la Universidad Nacional Autónoma de México, y el doctorado en ingeniería hidráulica y medio ambiente por la Universidad Politécnica de Valencia, España. Cuenta con el título de especialista universitario en hidráulica urbana por la misma universidad. Es autor de varios artículos presentados en congresos internacionales relacionados con los temas de hidráulica urbana y es coautor de algunos capítulos de libros en el campo de la toma de decisiones a través métodos meta heurísticos. Ha participado en proyectos de investigación, desarrollo e innovación (I+D) para la Unión Europea.

Joaquín Izquierdo-Sebastián. Es doctor en matemáticas y catedrático de matemática aplicada en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), donde imparte cursos de álgebra, cálculo, ecuaciones diferenciales, métodos numéricos en ingeniería y cursos de formación continua profesional. Realizó actividad investigadora en FluIng-IMM-UPV centrada en la aplicación de técnicas de análisis inteligente de datos, especialmente en hidráulica urbana. Es autor de más de 200 trabajos de investigación en revistas de alto impacto, capítulos de libros y contribuciones en congresos, editor de libros, director de tesis doctorales, autor de programas informáticos de simulación, coorganizador de eventos internacionales y participante en proyectos de I+D desde locales hasta internacionales.

Rafael Pérez-García. Es doctor ingeniero industrial y catedrático de ingeniería hidráulica en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Imparte docencia de grado, postgrado, doctorado y cursos técnicos profesionales en mecánica de fluidos e hidráulica con especialización en hidráulica urbana. Desarrolla su actividad investigadora en FluIng-IMM-UPV centrada en gestión técnica de sistemas de distribución de agua. Es autor de un gran número de trabajos de investigación, presentados en revistas de alto impacto, congresos y libros. Ha sido organizador de varios congresos y eventos internacionales, autor y coordinador de proyectos de software, responsable de proyectos de I+D y director de varias tesis doctorales.

Manuel Herrera-Fernández. Es licenciado en ciencias y técnicas estadísticas y técnico superior de investigación en el grupo FluIng-IMM de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). La próxima consecución del título de doctor en ingeniería hidráulica y medio ambiente será consecuencia de una prolífica actividad investigadora centrada en la aplicación de técnicas de minería de datos y aprendizaje automático en hidráulica urbana. Es autor de una decena de artículos de investigación y más de 50 comunicaciones a congresos nacionales e internacionales. Es profesor asociado en el Departamento de Matemática Aplicada de la UPV, donde imparte docencia en diferentes titulaciones.