

## La economía de las redes cerradas de abasto (2ª parte)

José Bienvenido Martínez Rodríguez  
Prof. Dr., Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), CUJAE  
e-mail: bienvenido@cih.cujae.edu.cu

### RESUMEN

En la primera parte de este trabajo se muestra que las ventajas económicas de una red mallada pueden revelarse explícitamente si se introduce un término, sobre costo de fallo, en la función objetivo de un modelo de optimización. Con un ejemplo se ilustró cómo una red mallada puede ser menos costosa que una ramificada. Adicionalmente, se introdujo una metodología para obtener no solo un valor adecuado para la confiabilidad de una red mallada sino también la demanda de diseño apropiada, todo a partir de un análisis de costos. En esta segunda parte se expone una visión más profunda sobre la comparación entre redes malladas y ramificadas mediante la aplicación de dicha metodología a ambos tipos de redes y comparando los resultados en términos de costo y de confiabilidad. Se incluyen también algunas consideraciones sobre distintas definiciones existentes de confiabilidad.

**Palabras clave:** análisis económico, diseño de redes, confiabilidad, optimización, abasto de agua

## The economy of water supply looped networks (2<sup>nd</sup> part)

### ABSTRACT

The first part of this work shows that the economic advantages of a looped network can be explicitly revealed by introducing a failure-cost term in the objective function of an optimization model. An example there illustrated how a looped network could be less costly than a branched one. A methodology was introduced in the first part to obtain not only an adequate value for the reliability of a looped network but also the appropriate design demand based on cost analysis. This second part presents a deeper insight into the comparison between looped and branched networks by applying the methodology to both types of networks and comparing the results in terms of cost and reliability. Considerations regarding available reliability definitions are also included.

**Keywords:** economic analysis, network design, network reliability, optimization, water supply.

## **INTRODUCCIÓN**

Es bien sabido que la aplicación de un algoritmo de optimización a una red mallada conduce a que se abran los circuitos formando una red ramificada o pseudo-mallada. Esto ha sido bien reconocido en la literatura (Watanatada 1973; Alperovits y Shamir 1977; Quindry et al. 1981; Rowell y Barnes 1982; Templeman 1982; Bhave 1985; Lansey et al. 1989; Goulter y Bouchart 1990; Awumah et al. 1991; Bouchart y Goulter 1991; Loganathan et al. 1995; Ostfeld y Shamir 1996; Khomsi et al. 1996, Martínez 2001,2007).

La matemática ha sido obstinada en apoyar la noción de que la red ramificada sea más barata. Pero los ingenieros se confían a la matemática solo cuando ella no contradice la lógica ingenieril y muchas redes de abasto de agua se construyen usando sistemáticamente el circuito. Esto se debe a que reconocen las ventajas de los circuitos aún cuando esas ventajas no han sido traducidas al lenguaje matemático.

En la primera parte de este trabajo las ventajas económicas de la red mallada se revelaron explícitamente mediante la formulación de una nueva función objetivo (FOB). Un ejemplo mostró cómo una red mallada podía ser menos costosa que una ramificada. Esta comparación entre mallada y ramificada se hizo considerando solamente la nueva FOB. Pero en la primera parte se introdujo también una metodología (basada en la nueva FOB) capaz de definir valores apropiados para la confiabilidad y la demanda de diseño de la red. Esta metodología se aplicó solamente a la red mallada. El propósito esencial de esta segunda parte (Martínez 2010) es aplicar la metodología a ambos tipos de red y realizar una comparación de resultados.

## **DEMANDA DE DISEÑO Y REDUNDANCIA**

Tradicionalmente, muchas redes de abasto de agua (RAA) se han diseñado con capacidad para satisfacer la demanda máxima horaria que pueda ocurrir al final del período de diseño. Antes de la era computacional, en este sentido, las reglas empíricas y la experiencia personal eran las únicas herramientas disponibles a los ingenieros en la práctica. Los cálculos manuales de la red representaban una tarea aburrida y tediosa. Los estimados de demanda eran poco precisos. Hoy en día, una serie de nuevos conceptos, bases de datos y herramientas computacionales están disponibles, con lo que el ingeniero puede dedicar más tiempo a tareas de más envergadura.

Diferentes proyecciones de demanda y alternativas de diseño de la red pueden probarse en muy poco tiempo. En este contexto la idea de la confiabilidad fue introducida probablemente como uno de esos nuevos conceptos para evaluar su comportamiento y seguridad. Aunque la definición de confiabilidad puede tomarse prestada de otras áreas de la ingeniería, hay que tener cuidado cuando se aplican a las RAA (Khomsi et al. 1996). La valoración de la confiabilidad en la RAA es compleja porque se trata de un sistema de múltiples componentes y existen muchos estados intermedios entre el estado de funcionamiento normal y el estado en que la red no da servicio alguno.

Además, el comportamiento de la red cae directamente bajo la influencia de varios factores como la configuración de su trazado, la variabilidad de la demanda y su crecimiento perspectivo, el envejecimiento de las tuberías y los fallos en estas últimas. Uno de los factores clave en el

diseño es su trazado y la competencia entre la red mallada y la ramificada como solución. El concepto de *redundancia* aparece en este contexto, el cual ha sido vinculado estrechamente con el concepto de confiabilidad (Goulter 1992; Park y Liebman, 1993; Khomsi et al. 1996). La redundancia en las RAA puede obtenerse de dos maneras: como conectividad y como capacidad. Hasta cierto punto –aunque todavía no se ha establecido bien y solo para redes malladas– estas dos maneras pudieran ser intercambiables (Duan et al. 1990).

Para aclarar las ideas, defínase el prototipo de una red NO-redundante (RNR) como una red ramificada cuyos diámetros se han diseñado para satisfacer el estimado de la demanda promedio actual. La lógica dice que, si se añaden nuevas tuberías para formar circuitos (asegurando al menos dos caminos desde la fuente a cada nodo) en esta RNR, se introduce la *redundancia conectiva* y debe esperarse que sean necesarios diámetros menores en las ramas originales porque ahora conducen un flujo menor. Diseñese de nuevo esta red, ahora mallada, para satisfacer las mismas demandas con nuevos diámetros y considérese como prototipo puro de red *conectiva redundante* (RCR).

En la mayoría de las obras de ingeniería los criterios de diseño, amparados en amplia experiencia, sugieren el empleo de factores de seguridad. En las RAA esto significa, en lo que concierne a la demanda, que el diseño no debe basarse en la demanda actual sino en un cierto valor máximo esperado de demanda que ocurrirá en algún momento de tiempo futuro. Como ya se mencionó, un criterio comúnmente empleado es el de la máxima demanda horaria esperada al final del período de diseño.

Si ahora las dos redes mencionadas arriba (RNR y RCR) se diseñan nuevamente para satisfacer esta máxima demanda entonces, en ambas redes, se introduce la *redundancia capacitiva*. El resultado es que la primera red es ahora una red conectiva NO-redundante y capacitiva redundante pero la segunda es redundante en ambos sentidos (conectiva y capacitiva). A la luz de todo esto y considerando la actual tecnología pueden plantearse varias interrogantes: (1) ¿cómo puede medirse esta redundancia?, (2) ¿cuál es el grado deseable de redundancia?, (3) ¿cuán grande debería considerarse el factor de seguridad en la demanda de diseño?

Respuestas iniciales a estas preguntas se dieron en la primera parte, donde se comparó el costo de una red mallada y una ramificada a base de una nueva FOB. Los resultados favorecieron a la red mallada. Y además, suponiendo que la confiabilidad pudiera ser una medida general de la redundancia, la metodología propuesta en la primera parte responde a las dos últimas preguntas para el caso de una red mallada: a partir de una secuencia de alternativas *óptimas* de diseño, con demanda de diseño y confiabilidad ambas crecientes, la alternativa de costo mínimo indica cuáles son los niveles justificables de ambos parámetros. Respuestas más amplias se abordan en esta segunda parte del trabajo.

## **CONFIABILIDAD**

Quizás el primer factor de seguridad introducido como práctica común en el trazado de las RAA es la formación de circuitos, aún cuando los costos de inversión aumentan. Normalmente con esto se persigue mejorar el servicio de la red en tiempo de fallo (tubería rota o fuera de servicio). Si estas roturas fueran eventos que nunca ocurrieran o si el tiempo de reparación fuera

extremadamente breve, no harían falta los circuitos. Por lo tanto, se necesitan los circuitos contra fallos, lo que significa añadir redundancia conectiva. Pero si la formación de circuitos se realiza cerrando ramas de diámetro grande con tuberías de pequeño diámetro, entonces la RAA no va a funcionar bien en tiempo de fallo, lo que a su vez implica la necesidad de añadir también la redundancia capacitiva. La conclusión que se desprende es que el tiempo de fallo en una RAA solo puede enfrentarse con ambas redundancias: la conectiva y la capacitiva.

Conviene señalar aquí otra importante conclusión: si ambas redundancias (conectiva y capacitiva) se necesitan para enfrentar el tiempo de fallo en una RAA, entonces una red ramificada difícilmente podrá comportarse de forma satisfactoria en tiempo de fallo. Aunque esta conclusión pueda parecer trivial a primera vista, ella significa que, si algún parámetro de confiabilidad da el mismo valor para una red mallada y otra ramificada comparables, entonces algo no anda bien con esa medida de confiabilidad. Como estas conclusiones se relacionan muy de cerca con las definiciones de confiabilidad, ellas parecen sugerir la conveniencia de definir un parámetro de confiabilidad que sirva para medir el comportamiento de una RAA *solamente en tiempo de fallo*.

Para calcular la confiabilidad en una RAA se han aplicado métodos diferentes. Aunque las clasificaciones tienen siempre algo de arbitrariedad, quizás los métodos pueden clasificarse en topológicos, analíticos y por simulación. La confiabilidad topológica enfatiza más la conectividad que el comportamiento hidráulico (Goulter y Coals 1986; Su et. al 1987, Yang et. al 1996). La confiabilidad analítica considera el comportamiento hidráulico mediante ecuaciones que relacionan las variables hidráulicas (demanda en nodos, coeficiente de fricción, presión nodal, etc.) (Xu y Goulter 1997b). La confiabilidad por simulación se dedica a estimar los déficits en la satisfacción de la demanda que resultan del comportamiento de la red tanto en tiempo normal como de fallo (Gupta y Bhave 1994; Xu y Goulter 1997a; Tanyimboh y Templeman 2000).

En muchos casos se usa una probabilidad para definir la confiabilidad. Quizás una probabilidad no es la mejor manera de definir confiabilidad. Al menos no por sí sola. Si se dice, por ejemplo, que una red es confiable en 98%, esto puede querer decir que será segura en 98 de cada 100 intervalos de tiempo (años por ejemplo). Pero no dice nada sobre los otros dos intervalos ni en qué medida dejan de ser seguros. Aún más, por ser un análisis probabilístico, no se puede saber cuándo se van a presentar los fallos.

La confiabilidad volumétrica se ha usado ampliamente (Gupta y Bhave 1994; Tanyimboh y Templeman 2000). Normalmente se define como la fracción media esperada (en sentido probabilístico) en que se satisface la demanda. Esta definición parece brindar más información sobre el periodo inseguro que la probabilidad por sí sola. Pero esta definición de confiabilidad volumétrica se refiere al promedio de comportamiento en el tiempo total, que incluye tanto el de operación normal como el de fallo. Como la frecuencia de fallo de las tuberías es muy baja, el tiempo de fallo suele ser una pequeñísima fracción del total, dígame el 1% (o incluso menos), y este 1% puede ser muy molesto para los usuarios sin que ello haya quedado reflejado en el parámetro de confiabilidad volumétrica.

Este razonamiento apunta hacia la misma conclusión anterior: algún parámetro de confiabilidad debe definirse para medir el comportamiento de una RAA *solamente en tiempo de fallo*. Quizás una buena definición en este sentido sería la fracción media esperada en que se satisface la demanda en tiempo de fallo. Esta definición tiene la ventaja adicional de que si una red se desempeña bien en tiempo de fallo, seguramente lo hará aún mejor en tiempo normal. Además, lo contrario no es necesariamente cierto.

La mayoría de las definiciones de confiabilidad y sus aplicaciones que aparecen en la literatura no consideran el trazado de la red. Pueden aplicarse indistintamente a redes malladas o ramificadas y nada en su valor numérico marca distinción alguna entre ambos tipos de red. Estas definiciones de confiabilidad, incluidas en modelos de optimización, no pueden prevenir que se abran los circuitos (Lansley et al. 1989; Duan et al. 1990; Loganathan et al. 1990). Mientras que la sugerencia anterior sobre una definición de confiabilidad en tiempo de fallo no se supone que evite el problema de que se abren los circuitos, se verá en el ejemplo una notable diferencia cuando se aplican a redes malladas o a ramificadas.

Hay otro argumento que se desprende del primer ejemplo de la primera parte de este trabajo. Dos redes casi idénticas se compararon en cuanto a costo total. El costo total incluye el costo esperado de fallos y este costo de fallos incluye el costo de suministrar, por otros medios, el déficit de agua que se deriva de las roturas.

La primera red es una de dos circuitos y la segunda es exactamente la misma red con la única diferencia de que una tubería de cada circuito se desconecta en uno de sus nodos, con lo que se abren los circuitos, y esta segunda red es de tipo ramificada. Nótese que las tuberías no se eliminan, el número de tuberías y sus diámetros respectivos son los mismos en ambas redes. Como resultado la ramificada es un 15% más cara que la mallada. Y esta diferencia se debe un poco a mayor costo de energía, pero en su mayoría se debe a la diferencia en el déficit de agua. Ese ejemplo refuerza la importancia de considerar el tiempo de fallo, ya que el déficit ocurre solo (en este caso) en tiempo de fallo y fue el que decidió a favor de la red mallada. El resultado de esa comparación puede generalizarse a cualquier red mallada siempre que la versión homóloga ramificada se obtenga de forma similar.

## TOLERANCIA

Parece ser que Tanyimboh et al. (2001) fue el primero en introducir la noción de *tolerancia*, que es, precisamente, una confiabilidad volumétrica medida solamente en tiempo de fallo. La deducción de la tolerancia se incluye a continuación. Suponiendo probabilidad cero para dos o más fallos simultáneos durante el tiempo de reparación, la probabilidad  $pf_0$  de que la red trabaje sin fallo es:

$$pf_0 = 1 - \sum_{k=1}^{NP} pf_k \quad (1)$$

donde:  $k$  : contador de tuberías;  $NP$ : número total de tuberías;  $pf_k$  : probabilidad de fallo de la tubería  $k$ .

El valor de  $pf_k$  es una función del diámetro de la tubería y de su longitud y puede obtenerse de fórmulas empíricas (Su et al. 1987; Bouchart y Goulter 1991; Cullinane et. al 1992; Gupta y Bhave 1994; Khomsi et al. 1996) considerando un tiempo medio para la duración de la reparación.

La confiabilidad volumétrica  $R$  puede expresarse de la forma usual (Gupta y Bhave, 1994; Xu y Goulter 1997a; Tanyimboh et al. 2001; Kalungi y Tanyimboh 2003):

$$R = \frac{1}{q^{req}} \left( q^{nf} pf_0 + \sum_{k=1}^{NP} q^k pf_k \right) \quad (2)$$

donde:

$q^{req}$  : demanda total requerida (suma de las demandas nodales)  
 $q^{nf}$  : suministro total real en el estado normal (sin fallo)  
 $q^k$  : suministro real en el estado cuando falla la tubería  $k$

Se define:

$$r_0 = q^{nf} / q^{req} \quad y \quad r_k = q^k / q^{req} \quad (3)$$

Se re-escribe la ecuación (2):

$$R = r_0 pf_0 + \sum_{k=1}^{NP} r_k pf_k \quad (4)$$

Para poder calcular  $q^{nf}$  y todos los  $NP$  valores de  $q^k$  se emplea un simulador “movido por presión” (pressure-driven) referido en la primera parte. Nótese en la ecuación (4) que el primer término de la derecha es la parte de la confiabilidad total que corresponde al tiempo normal (sin fallo) mientras que el segundo término corresponde al tiempo de fallo.

El índice de tolerancia tal como lo expresan sus autores (Tanyimboh et al. 2001) es:

$$T = \frac{R - r_0 pf_0}{1 - pf_0} \quad (5)$$

el que, considerando la ecuación (4), puede escribirse también:

$$T = \frac{\sum_{k=1}^{NP} r_k pf_k}{1 - pf_0} \quad (6)$$

donde el segundo término de la ecuación (4) ha sido dividido entre  $1 - pf_0$  para normalizar el tiempo de fallo y considerarlo como el 100% del tiempo. Esta tolerancia  $T$  es la fracción esperada de  $q^{req}$  (demanda total) que la red va a satisfacer durante el tiempo de fallo. En otras palabras, ella mide la bondad del funcionamiento de la red como promedio cuando cualquier tubería se rompe. Es una confiabilidad volumétrica medida solo durante el tiempo de fallo.

Una conclusión importante se deriva de la ecuación (6): el valor de la tolerancia  $T$  no depende de  $r_0$ , lo que significa que  $T$  es independiente del comportamiento bueno o malo de la red en tiempo normal. Puede verse que  $r_0$  es la confiabilidad volumétrica del tiempo normal. Si una red se comporta bien en tiempo normal resulta  $r_0 = 1$ . En este caso el valor de  $T$ , por sí solo, es una mejor medida de la confiabilidad que  $R$ . En caso contrario, pueden emplearse ambos índices.

Kalungi y Tanyimboh (2003) y Martínez et al. (2011) muestran aplicaciones interesantes de este concepto de tolerancia. Aunque la tolerancia no es una medida directa de la redundancia, ella parece reflejar bastante bien el impacto de la redundancia. Como sostienen sus autores, la tolerancia parece ser una buena medida inversa de la vulnerabilidad al fallo. A mayor tolerancia, menor vulnerabilidad. Como se dijo antes, si la principal razón para hacer mallada una red es enfrentar la rotura de tuberías, entonces el índice de tolerancia  $T$  parece el adecuado para redes malladas. Esto se verá ilustrado aún más en el ejemplo. Otra ventaja de este enfoque es que el esquema de tres índices de confiabilidad sugeridos por Gupta y Bhave (1994) pueden ser redefinidos y calculados solo dentro del tiempo de duración del fallo, aunque por simplicidad, no se van a abordar en detalle aquí.

### FORMULACIÓN DEL MODELO Y METODOLOGÍA

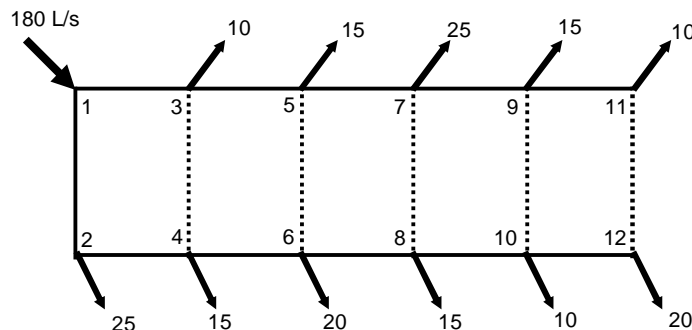
La formulación del modelo y la aplicación de la metodología son exactamente iguales a lo tratado en la primera parte de este trabajo. Por lo tanto, no resulta necesario repetirlos ahora. El lector puede repasar todos los detalles con solo ir a consultar dicha primera parte.

**TABLA 1 – Datos generales para ejemplo de la figura 1**

$pe^b$	$tp^c$	$c_1$	$\eta$	$m$	$10^5 a$	$u$	$t_f$	$c_f$	$c_a$
\$/kW-h	horas	-	-	-	-	-	dia	\$/dia	\$/m <sup>3</sup>
0.05	7 000	0.10	160.42	1.5	3.5	1.27	2.0	500	2.00

<sup>b</sup>( $pe$  = precio de energía)

<sup>c</sup>( $tp$  = tiempo de bombeo)



**FIGURA 1. Red ejemplo**



**EJEMPLO**

En la Figura 1 se muestra una red de cinco circuitos. Este es el mismo ejemplo de la primera parte. Los datos generales son los mismos de la Tabla 1, la elevación topográfica de los nodos de la red aparece en la Tabla 2. La presión requerida es de 20 m para todos los nodos, la longitud de todas las tuberías es de 400 m , el coeficiente de Hazen-Williams es 100 para todas las tuberías y los diámetros comerciales disponibles van desde 100 mm en adelante con incrementos de 50 mm. La demanda real sigue la curva de probabilidades Pearson tipo III ( $C_s=2 C_v$ ) con  $D_{act} = 90$  L/s y  $C_v = 1/3$ . La discretización de la curva de probabilidades se hace mediante 10 escalones iguales que dan un valor  $p_{ocur} = 0.10$  y el conjunto de valores de  $K_D$  se da en la Tabla 3. Los valores de demanda mostrados en la Figura 1 son para  $DD = 180$  L/s. Las demandas nodales para otros valores mantienen la misma proporción con la demanda total.

Se hicieron optimizaciones para valores de  $DD$  desde 110 L/s con incrementos de 10 L/s hasta 180 L/s. La Tabla 4 contiene el resumen de los costos y la Tabla 6 muestra los resultados de confiabilidad volumétrica  $R$  y tolerancia  $T$ . De la Tabla 4 puede verse que los costos de la FOB son siempre y que ocurre lo contrario para los costos adicionales. El Gran Total de costo en la última columna de la Tabla 4 alcanza un mínimo y luego crece de nuevo. El mínimo costo corresponde a  $DD = 150$  L/s. Las confiabilidades de la Tabla 6 crecen siempre con  $DD$ , los valores óptimos son, por supuesto, los asociados al mínimo costo.

De la Figura 1 se forma una red ramificada a partir de retirar las tuberías representadas por líneas de puntos. Esta red se somete al mismo proceso descrito en la metodología. La red ramificada se optimiza empleando el mismo modelo. Los resultados de costos se dan en la Tabla 5 y las confiabilidades en la Tabla 6.

La comparación de costo Capital para red mallada (Tabla 4) y ramificada (Tabla 5) para cada demanda de diseño muestra que ese costo es mayor o casi igual para la ramificada a pesar de que tiene cinco tuberías menos. Esto significa que tiene diámetros mayores con respecto a la red mallada. Este es el efecto de la optimización tratando de incrementar su redundancia capacitiva.

Comparación similar del costo Total de la FOB (cuarta columna en Tablas 4 y 5) muestra que, en todos los casos, la red mallada es menos costosa. Lo mismo ocurre para la última columna de Gran Total en todos los casos excepto cuando la demanda es 110 L/s en la cual la ramificada gana por un margen del 3%. Obsérvese que, en este caso particular, el costo de déficit adicional es el que hace la diferencia a favor de la ramificada.

**TABLA 2 – Elevación en Nodos**

Nodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Elevación (m)	40	40	42	42	44	44	46	46	48	48	50	50



**TABLA 3 – Escalones de demanda**

Escalón	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$K_D$	0.4998	0.6598	0.7571	0.8409	0.9211	1.0032	1.0931	1.1989	1.3516	1.6744

Indagando con mayor profundidad en los resultados, se encontró que la mayor parte de los déficits en este caso se deben a que la demanda real aleatoria excede la capacidad mientras que los menores déficits se deben a fallos de tuberías. La red ramificada, con mayores diámetros, se comportó mejor que la mallada bajo los mayores escalones de demanda  $D_{ns}$ .

**TABLA 4 – Resultados de Costos para red mallada del ejemplo**

Demanda	Costos de la Función Objetivo (\$/año)				Costos por la simulación (\$/año)			GRAN
	Capital	Energía	Fallo	Total	Déficit Adicional	Energía Adicional	Total Adicional	TOTAL
110	12 108	12 819	5 289	30 216	18 455	6.05	18 461	48 677
120	13 062	13 866	5 237	32 165	9 384	2.25	9 386	41 551
130	13 290	15 171	5 438	33 899	6 100	1.09	6 101	40 000
140	13 582	16 459	5 683	35 724	3 048	0.34	3 048	38 772
150	14 606	17 441	5 716	37 763	240	0.06	240	38 003
160	15 096	18 620	5 797	39 513	99	0.04	99	39 612

Comparando la mejor alternativa de costo en cada red puede verse que la mallada es menos costosa en un 17%. También es de interés advertir la máxima diferencia en el Gran Total de costo para cada red por separado, que para la mallada es de un 28% mientras que para la ramificada es de solo 6.3%. Esto parece ser consecuencia de la drástica reducción en el costo del déficit adicional en la red mallada en contraste con la modesta reducción de este costo en la ramificada.

En cuanto a confiabilidad y tolerancia, los valores de la Tabla 6 hablan por sí solos. Para todas las demandas de diseño la confiabilidad  $R$  en la red mallada supera a la correspondiente en la ramificada. No obstante puede verse que una red ramificada, diseñada óptimamente con el mismo modelo, puede alcanzar valores altos de confiabilidad por redundancia capacitiva. La diferencia marcada es la que señala el índice de tolerancia  $T$ : mientras que la red mallada alcanza valores cercanos al 100%, la ramificada no sobrepasa nunca el valor de 75%. Como ilustración, la Tabla 7 muestra la solución de diámetros para ambas redes con demandas de diseño de 140 y 150 L/s.

**TABLA 5 – Resultados de Costos para red ramificada del ejemplo**

Demanda	Costos de la Función Objetivo (\$/año)				Costos por la simulación (\$/año)			GRAN TOTAL
	L/s	Capital	Energía	Fallo	Total	Déficit Adicional	Energía Adicional	
110	12 008	12 223	7 899	32 130	15 143	16.5	15 160	47 290
120	13 308	13 320	7 966	34 594	9 874	14.4	9 888	44 482
130	13 584	14 444	8 400	36 428	8 043	13.7	8 057	44 485
140	14 188	15 503	8 661	38 352	6 116	13.0	6 129	44 481
150	14 756	16 543	8 892	40 191	5 001	12.5	5 014	45 205
160	15 032	17 758	9 243	42 033	4 864	12.2	4 876	46 909

Un comentario final: en la primera parte se dijo que Su et al. (1987) resuelve un ejemplo en que una red mallada es de menos costo capital que una ramificada pero con la condición de tener la misma confiabilidad. Los resultados mostrados aquí, en relación con el costo capital y la confiabilidad, son consistentes con ese resultado de Su et al. (1987).

La diferencia está en que el parámetro de confiabilidad es engañoso, porque no es cierto que las dos redes de dicho autor sean igualmente seguras, como se demuestra analizando el parámetro de tolerancia.

**TABLA 6 – Confiabilidad y Tolerancia para ambas redes**

Demanda (L/s)	Red Mallada		Red Ramificada		
	DD	R (%)	T (%)	R (%)	T (%)
110		99.7970	98.8280	99.7957	74.1212
120		99.8999	99.3511	99.8569	72.8675
130		99.9353	99.4600	99.8773	73.1015
140		99.9776	99.6305	99.8990	73.3914
150		99.9974	99.7828	99.9112	73.5501
160		99.9989	99.8349	99.9143	73.7636

**TABLA 7 – Solución de diámetros para ambas redes**

Tipo →		Red Mallada		Red Ramificada	
Demanda L/s →		140	150	140	150
Nodos de la Tubería		diámetro mm	diámetro mm	diámetro mm	diámetro mm
1	2	350	350	450	450
1	3	350	400	350	350
2	4	300	300	400	400
3	4	200	250	-	-
3	5	300	300	350	350
4	6	300	350	350	400
5	6	200	200	-	-
5	7	300	300	300	350
6	8	300	300	350	350
7	8	200	200	-	-
7	9	250	250	300	300
8	10	250	250	300	300
9	10	150	150	-	-
9	11	200	250	300	300
10	12	250	250	300	300
11	12	200	200	-	-
Diámetro medio		256	269	341	350

**CONCLUSIONES**

Se ha abordado en este trabajo la cuantificación de la economía de redes malladas y ramificadas comparables. La ventaja económica de la red mallada sobre la ramificada fue mostrada en la primera parte solo sobre la base del uso de una nueva FOB. La aplicación de la metodología completa, desarrollada también en la primera parte, confirma, mediante una detallada comparación, la conveniencia económica de las redes malladas sobre las ramificadas, aún cuando ambas redes han sido diseñadas de manera óptima con el mismo modelo.

La discusión pormenorizada sobre confiabilidad señala la conveniencia de emplear el tipo de índice de confiabilidad volumétrica, como definición preferible, sobre otras que emplean probabilidades como índice principal. También se han presentado varios argumentos y evidencia empírica para apoyar el uso del índice de tolerancia como medida indispensable del comportamiento de la red en tiempo de fallo, y su, aparentemente, insustituible papel como medida de comportamiento de la red mallada.

En cuanto a las tres interrogantes expresadas al principio, se ofrecen las siguientes respuestas:

(1) *¿Cómo puede medirse esta redundancia?*

Como se discutió antes, la mayoría de las definiciones existentes en la literatura no son una buena medida de la redundancia. A partir de la experiencia de los autores del índice de tolerancia (Tanyimboh et al. 2001; Kalungi y Tanyimboh 2003) y de los resultados mostrados en este trabajo, parece ser que la mejor medida, que existe hasta el momento, del impacto de la redundancia, es la tolerancia.

(2) *¿Cuál es el grado deseable de redundancia?*

La aplicación de la metodología propuesta conduce a un diseño con un mínimo Gran Total de costo y con un índice de tolerancia asociado como una buena medida del impacto de la redundancia. Esta debe ser entonces la redundancia justificable deseada.

(3) *¿Cuán grande debería considerarse el factor de seguridad en la demanda de diseño?*

La solución mencionada en el párrafo anterior también se asocia con una demanda de diseño específica que, nuevamente, es la óptima y justificable. Si se desea calcular un valor del factor de seguridad, puede hacerse mediante el cociente entre esta demanda de diseño óptima y la demanda media.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alperovits, E., and Shamir, U.** (1977), "Design of optimal water distribution systems." *Water Resour Res.*, 13(6), 885-900.
- Awumah, K.; Goulter, I. C., and Bhatt, S. K.** (1991). "Entropy-based redundancy measures in water distribution network design." *J. Hydr. Engrg., ASCE*, 117(5), 595-614.
- Bhave, P.R.** (1985). "Optimal expansion of water distribution systems." *Journal of Environmental Engineering Division, ASCE*, 111 (2), 177-197.
- Bouchart, F. and Goulter, I.** (1991). "Reliability improvements in design of water distribution networks recognizing valve location." *Water Resour Res.*, 27(12), 3029-3040.
- Chiong, C.** (1985). Optimización de redes cerradas, tesis doctoral, CIH, CUJAE, La Habana.
- Cullinane, M. J.; Lansey, K. E. and Mays, L. W.** (1992). "Optimization-availability-based design of water distribution networks." *J. Hydr Engrg., ASCE*, 118(3), 420-441.
- Duan, N.; Mays, L. W., and Lansey, K. E.** (1990). "Optimal reliability-based design of pumping and distribution systems." *J. Hydr. Engrg., ASCE*, 116(2), 249-268.
- Goulter, I.** (1992). "Systems analysis in water distribution network design: from theory to practice." *J. Water Resour. Plng. and Mgmt., ASCE*, 118(3), 238-248.
- Goulter, I. and Bouchart, F.** (1990). "Reliability-constrained pipe network model." *J. Hydr. Engrg., ASCE*, 116(2), 211-229.
- Goulter, I.C. and Coals, A.** (1986). "Quantitative approaches to reliability assessment in pipe networks." *J. Transp. Engrg., ASCE*, 112(3), 287-301.
- Gupta, R. and Bhave, R.** (1994). "Reliability analysis of water distribution systems." *J. Envir. Engrg., ASCE*, 120(2), 447-460.
- Kalungi, P. and Tanyimboh, T.T.** (2003). "Redundancy model for water distribution systems". *Reliability Engineering and System Safety, Elsevier*, 82, 275-286.
- Khomsy, D.; Walters, G. A.; Thorley, A. R. D. and Ouazar, D.** (1996). "Reliability tester for water-distribution networks." *J. Comp. in Civ. Engrg., ASCE*, 10(1), 10-19.
- Lansey, K.; Duan, N.; Mays, L. W. and Tung, Y.-K.** (1989). "Water distribution system design under uncertainty." *J. Water Resour Plng. and Mgmt., ASCE*, 115(5), 630-645.

- Loganathan, G.V.; Shah, M. P. and Sherali, H. P.** (1990). "A two-phase network design heuristic for minimum cost water distribution systems under a reliability constraint." *Engineering Optimization*, 15(4), 311-336.
- Loganathan, G.V.; Greene, J. J. and Ahn, T .J.** (1995). "Design heuristic for global minimum cost water distribution systems." *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, ASCE, 121 (2), 182-192.
- Martínez, J. B.** (2001). "El concepto de garantía en las redes de suministro de agua potable." V Congreso Intern. de Hidráulica, Pinar del Río, Octubre.
- Martínez, J. B.** (2007). "Quantifying the economy of water supply looped networks". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 133(1), 88-97.
- Martínez, J. B.** (2010). "Cost and reliability comparison between branched and looped water supply networks". *Journal of Hydroinformatics*, IWA, 12(2), 150-160.
- Martínez, J. B.; Montalvo, I.; Izquierdo, J. and Pérez-García, R.** (2011). "Reliability and tolerance comparison in water supply networks". *Water Resources Management*, EWRA-Springer, 25(5), 1437-1448.
- Ostfeld, A. and Shamir, U.** (1996). "Design of optimal reliable multi-quality water-supply systems." *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, ASCE, 122(5), 322-333.
- Park, H. and Leibman, J.** (1993). "Redundancy-constrained minimum-cost design of water distribution networks." *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, ASCE, 119(1), 83-98.
- Quindry, G.; Brill, E. D. and Liebman, J. C.** (1981). "Optimization of looped water distribution systems." *J. Envir. Engrg. Div.*, ASCE, 107(4), 665-679.
- Rowell, W. F. and Barnes, J. W.** (1982). "Obtaining the layout of water distribution systems." *J. Hydr. Div.*, ASCE, 108(1), 137-148.
- Su, Y.; Mays, L. W.; Duan, N. and Lansey, K.** (1987). "Reliability based optimization model for water distribution systems." *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 113(12), 1539-1556.
- Tanyimboh, T. T., and Templeman, A. B.** (2000). "A quantified assessment of the relationship between the reliability and entropy of water distribution systems." *Engrg. Optimization*, 33, 179-199.
- Tanyimboh, T. T.; Tabesh, M. and Burrows, R.** (2001). "Appraisal of source head method for calculating reliability of water distribution networks." *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, ASCE, 127 (4), 206-213.
- Templeman, A.** (1982). "Discussion of 'Optimization of looped water distribution systems' by Quindry et. al.", *J. Envir. Engrg. Div.*, ASCE, 108(3), 599-602.
- Watanatada, T.** (1973). "Least cost design of water distribution systems." *J. Hydr. Div.*, ASCE, 99(9), 1497-1512.
- Xu, C. and Goulter, I.C.** (1997a). "Simulation-based optimal design of reliable water distribution networks." *Proc., 3rd Int. Conf. on Modeling and Simulation*, A. Zayegh, ed., Victoria University of Technology, Melbourne, 107-112.
- Xu, C. and Goulter, I.C.** (1997b). "Reliability assessment of water distribution networks using the first order reliability method." *Managing water: Coping with scarcity and abundance*, M. English and A. Szollosi-Nagy, eds., ASCE, Reston, Va., 429-434.
- Yang, S.; Hsu, N.S.; Louie, P.W.F. and Yeh, W.W-G.** (1996). "Water distribution network reliability: connectivity analysis." *J. Infrastructure Systems*, 2 (2), 54-64.