

Comparación entre confiabilidad y tolerancia en las redes de abasto

INTRODUCCIÓN

En el caso de las redes de suministro de agua para la población, la práctica universal ha consagrado el empleo de lazos, mallas o circuitos de tuberías para garantizar no menos de dos rutas de conducción hacia todos los nodos de la red. Esta práctica se basa en la necesidad de reducir la cantidad de personas afectadas cuando se produce una rotura en una de las tuberías. La presencia de circuitos hace que las redes de abasto sean también llamadas redes cerradas (malladas).

Es ampliamente conocido que la minimización del costo de una red mallada produce una solución de red ramificada.^{1,2} Si se especifican diámetros mínimos para cerrar los circuitos, en la práctica sucede que si ocurre una rotura (fallo) en alguna de las ramas principales a través de estos diámetros mínimos, no hay capacidad de conducción suficiente y se produce una interrupción importante del servicio. Por lo tanto, el uso de circuitos de esta forma tiene poca o ninguna utilidad práctica.

En condiciones normales de operación no hacen falta circuitos, es decir, la red con circuitos es redundante. La redundancia se justifica solo para mantener el servicio, reducir el déficit y la cantidad de personas afectadas en el caso de que una tubería quede fuera de servicio por rotura u otras causas.

La redundancia no solo se manifiesta en la presencia de tramos adicionales, sino también en el diámetro con que se diseña cada tubería. Debido a la señalada inconveniencia de los diámetros mínimos para cerrar la red, esos tramos deben diseñarse con diámetros mayores, lo cual contribuye a la señalada redundancia.

En aras de precisar el lenguaje, debería hablarse por separado de conectividad y redundancia. Si una red abierta se convierte en cerrada con diámetros mínimos hay conectividad, pero no redundancia. La redundancia abarca dos conceptos estrechamente relacionados: la necesaria conectividad para proveer rutas alternativas de flujo

Resumen / Abstract

En la práctica se emplean las redes malladas o cerradas, que reducen la cantidad de usuarios afectados ante un fallo de la red. El concepto de garantía (confiabilidad) se aplica a una red de abastecimiento, para medir cuantitativamente la posibilidad de mantener un servicio adecuado en tiempo. Es de esperar que una red cerrada sea más "confiable" que una red abierta bajo condiciones de semejanza en configuración. En el presente trabajo se discuten dos índices cuantitativos: la garantía y la tolerancia para medir el comportamiento de una red en el sentido referido y se comparan las redes cerradas y abiertas.

Palabras clave: abasto de agua, confiabilidad, diseño de redes urbanas, tolerancia.

Looped networks have been used extensively in practice with the advantage of reducing the amount of affected users under a failure situation. The concept of reliability is applied as an attempt to measure quantitatively the possibility of keeping an adequate service level for a given time horizon. From the above, one should expect a looped network to be more reliable than a branched network under similar layout and sizing characteristics. In this paper two quantitative indices to measure expected network behavior are discussed: reliability and tolerance. These indices are calculated and a comparison is made between looped and branched networks.

Keywords: reliability, tolerance, urban network design, water supply.

hacia cada nodo y la capacidad de conducción (diámetro) adecuada para todas esas rutas.

GARANTÍA

Dados los distintos fenómenos que inciden sobre las redes, se ha venido trabajando en el cálculo y la asignación cuantitativa de valores probabilísticos a dichos fenómenos, con el fin de llegar a cuantificar la garantía (reliability en inglés) de funcionamiento de la red. En este sentido pueden consultarse los trabajos de Bao y Mays (1990), Goulter y Bouchart (1990), Jacobs y Goulter (1991), Lansey *et. al.* (1989), Quimpo y Shamsi (1991), Xu y Goulter (1998).³⁻⁸

La introducción del concepto de garantía y su cuantificación vienen dadas por la necesidad de medir y proveer un nivel adecuado de redundancia en la red.⁹ Los autores mencionados en el párrafo anterior utilizan diversas variantes que, en última instancia, definen el concepto de garantía de una red de abasto como la probabilidad con que la red garantiza la satisfacción de la demanda de diseño. Otros autores consideran, alternativamente, la proporción esperada con que la red satisface esta demanda.¹⁰⁻¹²

La variante de calcular la garantía global de una red a partir del producto de las probabilidades de no fallo de las tuberías aisladas,¹³ no dice mucho de la confiabilidad de una red mallada. En efecto, ya se dijo antes que la optimización habitual de una red mallada conduce a una solución de red ramificada. Si a esta red abierta se le calcula la garantía global de esta forma resulta ser más confiable que la red cerrada porque tiene menos tuberías y, por ende, menos productos. Este resultado, evidentemente, es absurdo.

El cálculo de la confiabilidad o garantía de las redes cerradas de suministro de agua, ya sea que se basen en la probabilidad de fallo o en la proporción esperada, se viene formulando en relación con las afectaciones de la demanda del usuario, provocadas por distintas causas:

- (1) Se produce una demanda mayor que la de diseño por ejemplo de incendio).
- (2) Ocurre un crecimiento de la población servida.
- (3) Se produce un envejecimiento de las tuberías.
- (4) Ocurren roturas de tuberías.

Obviamente, la formulación explícita de estas causas en términos probabilísticos y su integración posterior conlleva un alto grado de complejidad matemática y algorítmica. Véase, por ejemplo, que solo la causa (4) puede implicar la definición de unos cuantos indicadores de fallo si se consideran la frecuencia, duración esperada, tiempo entre fallos, demanda insatisfecha, ecétera.¹⁴⁻¹⁶

Trabajan los tres últimos aspectos de manera probabilística y llegan a una solución a partir de una complicadísima serie de algoritmos. Otros trabajos con fuerte carga computacional son los de Cullinane *et. al.* (1992)¹⁷ y Duan *et. al.* (1990)¹⁴. Un trabajo interesante que merece mención por su originalidad es el de Bouchart y Goulter (1991)¹⁸ que incide sobre la relación entre la garantía y la ubicación de válvulas.

Como resultado de todo esto,² se puede concluir que, hasta ahora no se ha formulado una definición de garantía que pueda, simultáneamente:

- Tener en cuenta todas las causas.
- Permitir su incorporación en modelos de optimización computacionalmente factibles.
- Estar al alcance y aceptarse por la comunidad profesional que labora en la práctica.

FORMULACIÓN

No obstante lo anterior, en este trabajo se emplea una formulación sencilla de la garantía como en Xu y Goulter (1997),¹¹ Tanyimboh *et al.* (2001), Kalungi y Tanyimboh(2003),¹² de la cual se pueden obtener conclusiones interesantes, sobre todo al comparar sus resultados con otro índice llamado aquí tolerancia.

Antes de definir el concepto de tolerancia, es necesario formular la garantía a partir de considerar exclusivamente la ocurrencia de fallos en las tuberías. También se supone que si una tubería sale de servicio, es posible aislarla de las demás y solo se afectan los usuarios conectados a ella.

Para expresar la garantía se considera solamente el fallo de una tubería a la vez. Esto se justifica por el hecho conocido de que la probabilidad de fallo simultáneo es extremadamente pequeña (Morgan y Goulter 1985;²⁰ Bouchart y Goulter 1991;¹⁸ Park y Liebman 1993;¹⁰ Xu y Goulter 1997;¹¹ Xu y Goulter 1998; Xu y Goulter 1999).¹⁵

Aceptando que la ocurrencia de dos o más fallos simultáneos tiene una probabilidad igual a cero, la probabilidad pf_0 de que la red trabaje sin fallos será:

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

donde:

k : Contador de tuberías.

NT : Número total de tuberías en la red.

pf_k : Probabilidad de fallo de la tubería k .

El valor de pf_k puede obtenerse, en función del diámetro y la longitud de la tubería, a partir de diferentes fórmulas empíricas^{17,18} y considerando un tiempo promedio de duración del fallo.

La garantía R se define:

$$R = \frac{1}{q^{req}} q^{nf} pf_0 + \sum_{K=1}^{NT} q^k pf_k \quad \dots(2)$$

donde:

q^{req} : Demanda total requerida por la red (suma de las demandas en todos los nodos).

q^{nf} : Caudal total entregado a la red cuando no ocurren fallos.

q^k : Caudal total entregado a la red cuando falla la tubería k .

Así definida, la garantía R representa la fracción esperada de q^{req} que la red puede satisfacer a lo largo del tiempo, mientras se mantengan las propiedades que la caracterizan y que se usaron para calcular dicha garantía.

Llamando:

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

la ecuación (2) se puede escribir:

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

Para una red ya dimensionada, sea que la red es existente o en proyecto, el valor de q^{req} es conocido por tratarse de la demanda de diseño. Para calcular el valor de q^{nf} y los NT valores de q^k es necesario utilizar un programa de computación simulador capaz de calcular las entregas que se realizan en los nodos cuando la red se encuentra en estado de fallo, es decir, ha fallado una de sus tuberías. Es evidente que si la red funciona bien cuando no se presentan fallos debe obtenerse $r_0 = 1$, es decir, $q^{nf} = q^{req}$, pero esto se comprueba también con el simulador.

Los simuladores clásicos de redes de abasto son del tipo inducidos por demanda (*demand-driven*) porque siempre satisfacen las demandas de diseño en los nodos y calculan las presiones en ellos. En la literatura (Jowitt y Xu 1993; Xu y Goulter 1997, Kalungi y Tanyimboh 2003) ya han aparecido varios simuladores que, a partir de conocer la carga (presión) en las fuentes, pueden hacer el cálculo de la red en estado de fallo y son, entonces, del tipo inducidos por carga (*head-driven*).

En este trabajo se utiliza un simulador,¹¹ en el cual se emplea, como ecuación de flujo inducido por carga en el nodo, la siguiente:

$$\frac{q_{real}}{D_{em}} = \left(\frac{p_{real} - p_{inf}}{p_{req} - p_{inf}} \right)^{0,5} \quad \dots(5)$$

donde:

q_{real} , D_{em} : Entrega real y demanda de diseño en el nodo, respectivamente.

p_{real} , p_{req} , p_{inf} : Presión real, requerida e inferior en el nodo, respectivamente.

Junto con esta ecuación se establecen dos condiciones:

(1) Si $p_{real} \geq p_{req}$ entonces $q_{real} = D_{em}$

(2) Si $p_{real} \leq p_{inf}$ entonces $q_{real} = 0$.

La deducción de esta ecuación puede encontrarse en Tanyimboh *et al.* (2001).

Tolerancia

Como se supone que las redes de abasto deben comportarse satisfactoriamente en condiciones normales, es decir, cuando no ocurren fallos ($r_0 = 1$), resulta interesante hacer un análisis separado y específico de su comportamiento exclusivamente bajo estados de fallo. Para ello se ha introducido,¹²⁻¹³ el concepto de tolerancia al fallo T mediante la expresión:

$$T = \frac{R - r_0 pf_0}{1 - pf_0} \quad \dots(6)$$

donde se emplean valores referidos a la red en su conjunto, aunque también puede formularse la tolerancia para cada nodo individual.

Esta tolerancia al fallo representa la fracción esperada de q^{req} que la red puede satisfacer durante los períodos de tiempo en que se encuentra bajo condiciones de fallo. En otras palabras, este índice responde a la pregunta de cuán bien se comporta la red, como promedio, cuando alguna tubería queda fuera de servicio.

Aunque no ha sido fundamentado teóricamente por sus autores en los trabajos recién mencionados, este índice se basa en la ecuación (4). Puede observarse que su primer término de la derecha representa la parte de la garantía correspondiente a la red sin fallo y el segundo es la parte que refleja, de conjunto, los estados con fallo.

En la práctica, numéricamente, el primer término es mucho mayor que el segundo, ya que la probabilidad de fallo es siempre pequeña, aun cuando se sumen los de todas las tuberías. Esto significa que el tiempo en que la red se encuentra en algún estado de fallo (la suma de todos los períodos de fallo) es una pequeña fracción del tiempo total. El numerador de la ecuación (6) se obtiene de la (4) despejando su segundo término de la derecha, es decir:

$$R - r_0 pf_0 = \sum_{k=1}^{NT} r_k pf_k \quad \dots(7)$$

Pero la definición de tolerancia se refiere solamente a la parte de tiempo en que la red está en estado de fallo, por tanto, es necesario normalizar ese tiempo, o sea, referirse a ese tiempo como un 100 %, para lo cual se multiplica la tolerancia T por su probabilidad de ocurrencia $1 - pf_0$ y así se obtiene la ecuación (6).

Obsérvese que esto es lo mismo que dividir la ecuación (7) entre $1 - pf_0$, porque, como ya se dijo antes, la fracción de tiempo con fallo es pequeña comparada con el tiempo total. De la ecuación (7) resulta evidente una conclusión importante: el valor de la tolerancia no está influido por el valor de r_0 .

En el trabajo de Kalungi y Tanyimboh (2003), sus autores demuestran la utilidad del índice de tolerancia con varios ejemplos.

Comparación entre confiabilidad y tolerancia en las redes de abasto

Si bien la tolerancia no es una medida explícita de la redundancia, según se definió el vocablo redundancia, el índice de tolerancia parece reflejar muy bien el impacto de la redundancia.

Y aún más, como sostienen los mencionados autores, parece dar una medida inversa adecuada de la vulnerabilidad de una red o, incluso, de todo el sistema de abasto si se incluyen los otros componentes en su cálculo. Inversa porque a mayor tolerancia menor vulnerabilidad.

Puede señalarse que la garantía R , más que otra cosa, es una medida del comportamiento de la red en condiciones normales. Dicho de otra forma, la garantía no refleja bien el comportamiento en situaciones de fallo. Esto se debe, como ya se dijo, a que el término $r_o pf_o$ de la ecuación (4) es ampliamente predominante. En cambio, la tolerancia T se refiere solo al tiempo en que la red se encuentra en un estado inferior.

Como que la razón principal de la red cerrada es, precisamente, reducir la afectación producida por los fallos, en el presente trabajo se ilustra con ejemplos el uso de los índices de garantía y tolerancia para comparar el comportamiento de redes cerradas y abiertas.

EJEMPLOS ILUSTRATIVOS

Para el estudio referido se introduce una red ejemplo en la figura 1 se representa una red abierta de una sola fuente con once tuberías y doce nodos de demanda, pero sin circuitos ya que de inicio, las líneas discontinuas no representan tuberías.

Las demandas aparecen en la figura en litros por segundo (L/s). La topografía de los nodos aparece en la tabla 1. La presión requerida en todos los nodos es $p_{req} = 20$ m y la inferior es $p_{inf} = 0,20 p_{req}$.

La longitud de todas las tuberías es de 400 m y se emplea como fórmula de fricción la de Hazen-Williams con un coeficiente de 100 para todas las tuberías. Los diámetros se presentan en la tabla 2.

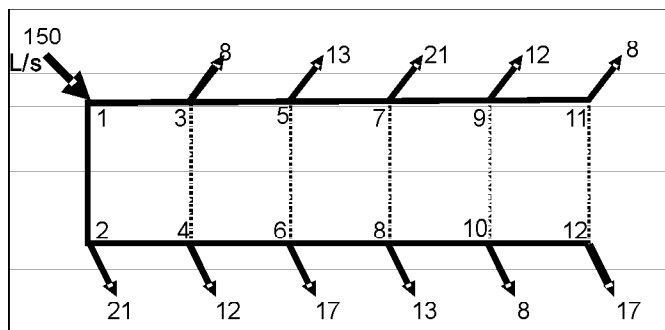


FIGURA 1
Red ejemplo.

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

Tuberías	1-2	1-3	2-4	3-5	4-6	5-7
Diám (mm)	350	400	300	300	350	300
Tuberías	6-8	7-9	8-10	9-11	10-12	-
Diám (mm)	300	250	250	250	250	-

La fórmula para calcular la probabilidad de fallo es :

$$Pf_k = aL_k t_f / 365 \quad \dots(8)$$

donde:

L_k, d_k : Longitud y diámetros de la tubería K (m).

t_f : Tiempo promedio de duración del fallo = 2 d.

365 : Número de días por año.

a : Coeficiente de la fórmula empírica = $3,50 \cdot 10^{-5}$

u : Exponente de la fórmula empírica = 1,27

Con el fin de estudiar la variación de los índices para distintas configuraciones de la red ejemplo se han definido los siguientes casos. La carga total en la fuente (nodo 1) es $H1 = 80$ m.

Primer Grupo:

- (a) La red tal como está en la figura.
- (b) Se añade solo la tubería 3-4 con 250 mm.
- (c) Se añade solo la tubería 5-6 con 200 mm.
- (d) Se añade solo la tubería 7-8 con 200 mm.
- (e) Se añade solo la tubería 9-10 con 200 mm.
- (f) Se añade solo la tubería 11-12 con 200 mm.

Segundo Grupo: (con los mismos diámetros del primer grupo)

- (g) Se añaden solo las tuberías 3-4 y 5-6.
- (h) Se añaden solo las tuberías 9-10 y 11-12.
- (i) Se añaden solo las tuberías 3-4, 5-6 y 7-8.
- (j) Se añaden solo las tuberías 7-8, 9-10 y 11-12.
- (k) Se añaden todas, formándose cinco circuitos.

Los resultados en términos de garantía y tolerancia de las corridas de todos estos casos se aprecian en la tabla 3.

Tabla 3 Garantía y tolerancia de los casos del primero y segundo grupos			
Caso %	a	b	c
Garantía	99,893 1	99,935 2	99,947 7
Tolerancia	73,6920	85,6454	88,7856
Caso %	d	e	f
Garantía	99,960 3	99,964 7	99,966 2
Tolerancia	91,4919	92,4282	92,7430
Caso %	g	h	i
Garantía	99,957 6	99,977 9	99,977 7
Tolerancia	91,7070	95,7954	96,0902
Caso %	j	k	-
Garantía	99,989 3	99,999 4	-
Tolerancia	98169 1	99,910 7	-

El caso (a) es el único que forma una red abierta pura. La garantía es alta porque tiene diámetros suficientes para las demandas planteadas. Véase cómo aquí la garantía no refleja la falta de conectividad redundante: solo hay un camino de la fuente a cada nodo. Sin embargo, la tolerancia sí lo refleja con un valor mucho menor indicando una red vulnerable al fallo.

Los casos (b) hasta (e) forman redes mixtas con un circuito y el caso (f) es una red cerrada de un circuito. Véase que tanto la garantía como la tolerancia van creciendo gradualmente a medida que el único circuito se hace mayor. El brusco incremento de tolerancia entre los casos (a) y (b) da una medida del efecto de la redundancia.

El paso del caso (f) al (g) se produce con una ligera reducción de ambos índices porque la red (f) es completamente cerrada y la (g) es mixta. De ahí en adelante

nuevamente crecen los dos índices hasta el caso (k) que es una red cerrada de cinco circuitos y los valores alcanzados son muy altos. En general, las redes del segundo grupo tienen mayor tolerancia al fallo que las del primer grupo porque son más redundantes. Vale la pena insistir en el significado de la tolerancia, nótese que la red (k) es capaz, aun en estado de fallo, de garantizar como promedio más del 99,9 % de la demanda de la red.

Tercer grupo:

Se definen los casos (a1), (d1), (f1) y (k1) similares, respectivamente, a los casos (a), (d), (f) y (k) con la diferencia de que se ejecutan con $H_1 = 90$ m. Sus resultados se reportan en la tabla 4. Excepto en el caso (a1), el efecto del aumento de carga en la fuente se refleja con un aumento en la garantía y un aumento todavía mayor en la tolerancia, comparados con sus homólogos de los grupos anteriores. El caso (a1) es la excepción porque, al no haber redundancia, el incremento de H no representa una mejora para aliviar los fallos.

Cuarto grupo:

Se definen los casos (c2), (d2), (e2) y (f2) similares, respectivamente, a los casos (c), (d), (e) y (f) con la diferencia de que las tuberías tienen ahora un diámetro menor e igual a 100 mm. Sus resultados se reportan en la tabla 4. Comparando con sus homólogos del primer grupo se observa una reducción de la garantía, pero la reducción de la tolerancia es mucho mayor. Esto es explicable porque la reducción de diámetro significa reducir redundancia y esto se refleja más claramente en la tolerancia. Este es otro argumento más que refuerza la inconveniencia de cerrar circuitos con tuberías de poco diámetro.

Quinto grupo:

Se definen los casos (a3), (f3) y (k3) similares, respectivamente, a los casos (a), (f) y (k) con la diferencia de que ahora se coloca una segunda fuente en el nodo 12. Esta fuente tiene una carga igual a $H_{12} = 85$ m y se supone que no está limitada en cuanto al caudal que puede entregar. Sus resultados se reportan en la tabla 4.

Comparando con sus homólogos del primer grupo se observa un crecimiento, tanto de la garantía como de la tolerancia. El incremento en tolerancia es mayor. Esto ocurre incluso en la red abierta del caso (a). La explicación es que la existencia de una segunda fuente actúa como un aumento de la redundancia. En este caso particular, al ubicarla en el nodo 12 y no estar limitada en su entrega, la presencia de la segunda fuente equivale a cerrar la red porque, desde esa posición, hay caminos alternativos hacia todos los nodos.

Por último, un breve comentario sobre los casos (k1) y (k3) que tienen ambos índices en el 100 %. Aunque esto puede parecer teórico, el resultado se obtuvo con seis decimales nulos y lo que indica es que esa red con cinco circuitos es una red muy robusta.

CONCLUSIONES

A partir de una revisión bibliográfica de trabajos que, fundamentalmente, se publicaron en la década más reciente, en el presente trabajo se hace un análisis de las tendencias modernas en relación con la idea de medir y evaluar el funcionamiento de la red a través del concepto de garantía.

Se ha analizado el empleo de las redes cerradas como práctica universal en este tipo de redes y cómo su optimización habitual conduce a una solución de red abierta que, si se **cierra** con diámetros mínimos, no provoca la necesaria redundancia. El ejemplo estudiado ilustra claramente esta afirmación.

Este concepto de redundancia se discute también con alguna extensión, así como su relación con el concepto de confiabilidad o garantía. Se introduce el concepto de tolerancia y su relación con la redundancia, y se explica el origen de la fórmula para el cálculo de la tolerancia como expresión que refleja el comportamiento de la red ante situaciones de fallo.

De particular interés es la conclusión de que el valor de la tolerancia no está influido por el valor de r_0 , lo que refuerza la independencia de su significado respecto al concepto de garantía. Precisamente por ello es que la tolerancia mide mejor la diferencia de comportamiento entre redes abiertas y cerradas.

Se han hecho numerosas evaluaciones de ambos índices en un ejemplo que permite conformar redes abiertas, mixtas y cerradas destacándose la sensibilidad del índice de tolerancia y su eficacia para reflejar el efecto de la redundancia. Esto se ha hecho para variaciones en la configuración de la red, aumento de la carga en la fuente, empleo de diámetros menores y presencia de dos fuentes.

La evidencia mostrada refuerza la idea de la conveniencia del uso del índice de tolerancia para medir el comportamiento y la vulnerabilidad de una red ante la presencia de fallos. Especialmente de gran utilidad resulta la tolerancia cuando se pretende justificar el empleo de redes cerradas.

REFERENCIAS

1. **CHIONG, C.:** "Optimización de redes cerradas". Tesis Doctoral, CIH, ISPJAE, La Habana, 1985.
2. **GOULTER, I.:** "Systems Analysis in Water Distribution Network Design: From Theory To Practice". *J. Water Resour. Plng. y Mgmt.*, ASCE, 118(3), 238-248, 1992.
3. **BAO, Y. & L. W. MAYS:** "Model for Water Distribution System Reliability". *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 116(9), 1119-1137, 1990.
4. **GOULTER, I. & F. BOUCHART:** "Reliability-Constrained Pipe Network Model". *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 116(2), 211-229, 1990.
5. **JACOBS, P. & I. GOULTER:** "Estimation of Maximum Cut-set Size for Water Network Failure". *J. Water Resour. Plng. y Mgmt.*, ASCE, 117(5), 588-605, 1991.
6. **Lansley, K. et al.:** "Water Distribution System Design Under Uncertainty". *J. Water Resour Plng. y Mgmt.*, ASCE, 115(5), 630-645, 1989.

7. **QUIMPO, R. & U. SHAMSI:** "Reliability-based Distribution System maintenance". *J. Water Resour Plng. y Mgmt.*, ASCE, 117(3), 321-339, 1991.
8. **XU, C. & I. GOULTER:** "Probabilistic Model for Mater Distribution Reliability". *J. Water Resour. Plng. y Mgmt.*, ASCE, 124(4), 218-228, 1998.
9. **GOULTER, I.:** "Modern Concepts of a Water Distribution System. Policies for Improvement of Networks with Shortcomings." *Water Supply Systems: State of the Art y Future Trends*, E. Cabrera y F. Martínez, Eds., Univ. Polit. Valencia, Spain, Comput. Mech. Publ., Southampton, Boston, 121-138, 1993.
10. **PARK, H. & J. LEIBMAN:** "Redundancy-Constrained Minimum-Cost Design of Water Distribution Networks". *J. Water Resour. Plng. y Mgmt.*, ASCE, 119(I), 83-98, 1993.
11. **XU, C. & I. GOULTER:** Simulation-Based Optimal Design of Reliable Water Distribution Networks. *Proc., 3rd Int. Conf. on Modeling y Simulation*, A. Zayegh, Ed., Victoria University of Technology, Melbourne, 107-112, 1997.
12. **KALUNGI, P. & T. T. TANYIMBOH:** "Redundancy Model for Water Distribution Systems". *Reliability Engineering & System Safety*, Elsevier, 82(3), 275-286, 2003.
13. **JOWITT, P. & C. XU.:** "Predicting Pipe Failure Effects in Water Distribution Networks". *J. Water Resour. Plng. y Mgmt.*, ASCE, 119(I), 18-31, 1993.
14. **DUAN, N.; L. W. MAYS & K. E. LANSEY:** "Optimal reliability-based Design of Pumping y Distribution Systems". *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 116(2), 249-268, 1990.
15. **XU, C. & I. GOULTER:** "Reliability Based Optimal Design of Water Distribution Networks". *J. Water Resour. Plng. y Mgmt.*, ASCE, 125(6), 352-362, 1999.
16. ———. : "A Model for Optimal Design of Reliable Water Distribution Networks". *Hydraulic Engineering Software VIII*, W.R. Blain y C.A. Brebbia, Ed., WIT Press, Southampton, Boston, 71-80, 2000.
17. **CULLINANE, M. J; K. E. LANSEY & L. W. MAYS:** "Optimization-availability-Based Design of Water Distribution Networks". *J. Hydr Engrg.*, ASCE, 118(3), 420-441, 1992.
18. **BOUCHART, F. & I. GOULTER:** "Reliability Improvements in Design of Water Distribution Networks Recognizing Valve Location". *Water Resour Res.*, 27(12), 3029-3040, 1991.
19. **TANYIMBOH, T. T; M. TABESH & R. BURROWS:** "Appraisal of Source Head Methods for Calculating Reliability of Water Distribution Networks". *J. Water Resour Plng. y Mgmt.*, ASCE, 127(4), 206-213, 2001. Ed., Victoria University of Technology, Melbourne, 107-112, 1997.
20. **MORGAN, D. R. & I. C. GOULTER:** "Optimal Urban Water Distribution Design". *Water Resour. Res.*, 21(5), 642-652, 1985.