

CMN 2017

Congress on Numerical Methods in Engineering

July 3 - 5, Valencia, Spain

Edited by: Irene Arias, Jesús María Blanco, Stephane Clain, Paulo Flores,
Paulo Lourenço, Juan José Ródenas and Manuel Tur



Congress on Numerical Methods in Engineering

CMN 2017

**July 3 - 5
Valencia, Spain**

A publication of:

**International Center for Numerical
Methods in Engineering (CIMNE)**
Barcelona, Spain



Printed by: Artes Gráficas Torres S.L., Huelva 9, 08940 Cornellà de Llobregat,
Spain

ISBN: 978-84-947311-0-5

ESTRATEGIA PARA EL MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE REDES DE AGUA POTABLE EN PAÍSES EN VÍAS DE DESARROLLO BASADA EN LA CAPACIDAD DE LA RED

Amilkar E. Ilaya-Ayza¹, Wanda Sanjinés¹, Carlos Martins², Enrique Campbell³ y
Joaquín Izquierdo²

1: Facultad Nacional de Ingeniería,
Universidad Técnica de Oruro,
Ciudad universitaria s/n, Oruro, Bolivia
e-mail: amilkar.ilaya@uto.edu.bo, rosanjines@gmail.com

2: FluIng-IMM,
Universitat Politècnica de València.
Camino de Vera s/n, Edif. 5C, 46022 Valencia
e-mail: carlos.martins.a@gmail.com, jizquier@upv.es web: <https://fluIng.upv.es/>

3: Berliner Wasserbetriebe,
10864 Berlin, Amtsgericht Charlottenburg, HRA 30951 Germany
e-mail: Enrique.Campbellgonzales@bwb.de

Palabras clave: Mantenimiento de redes de agua, índice de mantenimiento, capacidad de la red.

Resumen *La planificación de las tareas de mantenimiento suele ser una tarea pendiente en sistemas de agua potable que tienen escasez económica, pues los recursos no abastecen para lograr un mantenimiento preventivo convencional, en el cual se deben inspeccionar todos los tramos de la red. Este contexto exige el planteamiento de soluciones racionales que permitan priorizar las tareas de mantenimiento en tramos específicos, con el fin de gestionar mejor los pocos recursos de estas empresas de agua. En el presente trabajo se propone el índice de mantenimiento para la evaluación de cada tubería, un indicador basado en el criterio hidráulico de la capacidad de la red, calculado por un mecanismo computacional, con el objetivo de optimizar los recursos. De esta forma, es posible priorizar los tramos de la red que requieren mayor atención en las tareas de mantenimiento. Como caso de estudio, se analiza el sector S01-13 de la red de agua potable de Oruro (Bolivia). Los resultados muestran que se debe priorizar el control eficiente del 20% de las tuberías del sector.*

1. INTRODUCCIÓN

Una de las formas de garantizar la provisión de agua potable a la población es a través del buen mantenimiento de las redes de suministro [1]. Un mantenimiento eficiente permite reducir las pérdidas de agua y ofrecer un mejor servicio.

Existen tres estrategias para realizar el mantenimiento de las redes de agua potable: pasiva, preventiva y de inspección [1]. La pasiva no requiere ningún tipo de planificación debido a que se realizan acciones correctivas en función de las averías en la red. La estrategia preventiva exige la inspección de toda la red, sin ningún tipo de priorización. Finalmente la estrategia de inspección, requiere el monitoreo constante de la red, estableciendo un nivel de fugas del cual dependen los trabajos de mantenimiento.

Totsuka *et al.* [2] sugieren que la escasez económica y la mala gestión son dos causas primordiales que causan deficiencias en los sistemas de agua. Generalmente, este es un contexto común en los países en vías de desarrollo; por lo tanto, es necesario generar herramientas que permitan mejorar la gestión y hacer más eficiente el uso de los recursos limitados de las empresas de agua ubicadas en estos países.

Dos de las tres estrategias de mantenimiento requieren la inspección de la red. Sin embargo, una empresa de agua en escasez económica no cuenta con los recursos suficientes para realizar la inspección en toda la red; por lo tanto, deben priorizarse los tramos, seleccionando aquellos que tengan mayor relevancia en relación a la calidad del servicio a la población.

En el presente trabajo, se propone un índice para el mantenimiento de redes de agua potable, basado en la importancia de cada tramo relacionada con la capacidad de la red. Como caso de estudio se utiliza uno de los sectores de la red de suministro de agua potable de la ciudad de Oruro (Bolivia), un sistema con escasez económica.

Como herramientas para el mantenimiento de redes, es común el uso de métodos probabilísticos utilizados para estimar el número esperado de fallas [3]. Asimismo, se usan modelos de decisión multicriterio para la planificación del mantenimiento preventivo [4].

1.1. Tipos de mantenimiento de redes

Las intervenciones de mantenimiento de la red son clasificadas según el tipo de estrategia que se utilice, estas son: estrategia pasiva, estrategia preventiva y estrategia de inspección.

1.1.1. Mantenimiento causado por eventos. Estrategia pasiva

Bajo esta clasificación, se consideran solamente las fallas o averías que ya ocurrieron. Generalmente, son reportados por los usuarios debido a las caídas de presión. Este tipo de mantenimiento es característico de empresas de agua que no tienen una gestión adecuada de las pérdidas de agua [1].

1.1.2. Mantenimiento con intervenciones por intervalos. Estrategia preventiva

Esta estrategia establece un mantenimiento periódico. Se considera que las tasas altas en averías exigen tiempos de intervención más cortos. La estrategia preventiva exige mucho

trabajo debido a que se debe inspeccionar toda la red sin que importe su condición real [1].

1.1.3. Mantenimiento definido por las condiciones. Estrategia de inspección

Cuando se monitorean las fugas y la condición de la red por medio de inspecciones y mediciones de flujo, es posible realizar el mantenimiento tan pronto como el nivel de fugas alcance un nivel crítico, en base a las condiciones económicas que implican estas pérdidas. Este tipo de acción es más eficiente para la reducción de las fugas de agua en la red [1]. Para el uso de este tipo de estrategia es necesario que la red se encuentre sectorizada.

2. METODOLOGÍA

Es necesario que una red, o sector de una red, cuente con la capacidad suficiente para el suministro a todos los usuarios. Esta es la premisa para el diseño y gestión de los sistemas de suministro de agua potable. Sin embargo, la capacidad de la red como tal es poco analizada, pues es utilizada como un elemento cualitativo de la red y no cuantitativo, como debería ser.

Según Fernández & Márquez [5], existen dos formas de gestionar la capacidad de la red: la primera es gestionando la capacidad a largo plazo; esta tarea suele ser responsabilidad del departamento de planificación o ingeniería de la empresa de agua; la segunda forma de gestión es a corto plazo; por lo general, es responsabilidad del departamento de mantenimiento de la empresa.

Es común cuantificar la capacidad de los elementos de una red de agua potable, como los depósitos, reservorios, plantas de tratamiento y bombas; sin embargo, se analiza poco la capacidad de la red de suministro, uno de los componentes más importantes del sistema de agua potable [6].

Ilaya-Ayza *et al.* [7] proponen una forma de cuantificar la capacidad de la red por medio del cálculo del caudal máximo teórico, basado en el análisis de la curva de consigna [8]. Cuantificar la capacidad de la red permite la toma de decisiones precisas con relación a las acciones que se deben tomar para mejorar el diseño y la gestión de los sistemas de agua potable.

Para determinar la importancia de cada una de las tuberías de la red para las tareas de mantenimiento, se propone el índice de mantenimiento, el cual está basado en la evaluación de la capacidad tras cierre de cada una de las tuberías de la red.

Para desarrollar esta metodología se utiliza el programa EPANET 2.0 [9], con apoyo del motor de cálculo TOOLKIT.

2.1. Capacidad de la red

La capacidad de la red está definida como la demanda máxima (o flujo) que puede ser satisfecha, mientras se mantienen las presiones adecuadas en la red, garantizando estrictamente la presión mínima requerida (P_{min}) en el punto con la menor presión [7].

Cuando la red no tiene capacidad, su respuesta es reducir las presiones en los nudos hasta

alcanzar la demanda total de los usuarios.

La medición de la capacidad de la red a través del caudal máximo teórico (Figura 1) se realiza en condiciones de suministro normales; es decir, no se consideran incrementos bruscos de la demanda, como situaciones de incendios o reventones en la red. Asimismo, se asume que la demanda en la red es uniforme; por lo tanto, el incremento o decremento del caudal demandado es también uniforme en los nudos de la red [7].

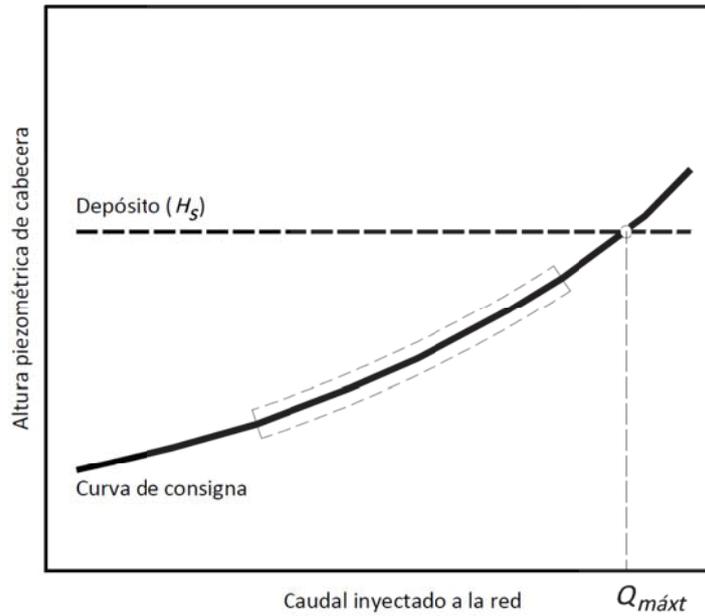


Figura 1. Caudal máximo teórico

Partiendo de dos factores pico conocidos (K_{n-1} y K_n), los cuales definen un caudal Q_{n-1} y Q_n , es posible calcular las alturas piezométricas correspondientes en la curva de consigna (H_{n-1} y H_n), además de las alturas motrices en la fuente de suministro ($H_{s_{n-1}}$ y H_{s_n}). Bajo estas condiciones, el nuevo caudal (Q_{n+1}) del proceso de iteración es:

$$Q_{n+1} = \left(\frac{Q_n - Q_{n-1}}{H_n - H_{n-1}} \right) \left(\frac{H_{s_n} + H_{s_{n-1}}}{2} - H_n \right) + Q_n. \quad (1)$$

El cual define un nuevo factor pico (K_{n+1}), basado en el caudal medio de demanda de la red Q .

$$k_{n+1} = \frac{Q_{n+1}}{Q}. \quad (2)$$

El diagrama de flujo utilizado para calcular la capacidad de la red o caudal máximo teórico ($Q_{máxt}$) es mostrado en la Figura 2.

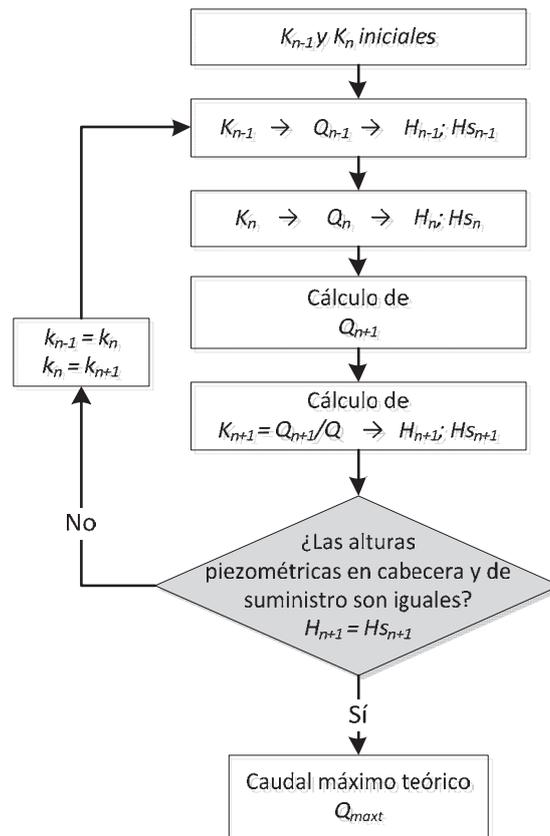


Figura 2. Diagrama de flujo para la determinación del caudal máximo teórico de la red

2.2. Índice de mantenimiento de redes

Es común que el mantenimiento de las redes de suministro de agua potable se realice aislando los lugares donde se presentan las averías, con el fin de no perjudicar a los demás usuarios. Dependiendo del lugar donde se produzcan las fallas, el efecto del aislamiento puede ser significativo en la calidad del servicio del conjunto de la red.

El impacto del cierre de un tramo, durante la etapa de mantenimiento de la red, puede ser cuantificado a través de la modificación de la capacidad de toda la red. Por lo tanto, si se conoce la capacidad actual de la red, con todos los tramos o tuberías trabajando, y la capacidad de la red tras el cierre del tramo o tubería evaluada, puede calcularse el índice de mantenimiento que relaciona ambos caudales.

Gestionar la capacidad de la red a corto plazo, es una de las tareas principales de los departamentos de mantenimiento de las empresas de agua [5].

El índice de mantenimiento ($I_{m,p}$) de la tubería p , está definido por la relación entre el caudal máximo teórico de toda la red (Q_{maxt}^{red}) y el caudal máximo teórico tras el cierre de la tubería p (Q_{maxt}^p).

$$I_{m,p} = \frac{Q_{máxt}^p}{Q_{máxt}^{red}} \quad (3)$$

Para el cálculo del índice de mantenimiento en cada una de las tuberías de la red, se utiliza el diagrama de flujo expuesto en la Figura 3.

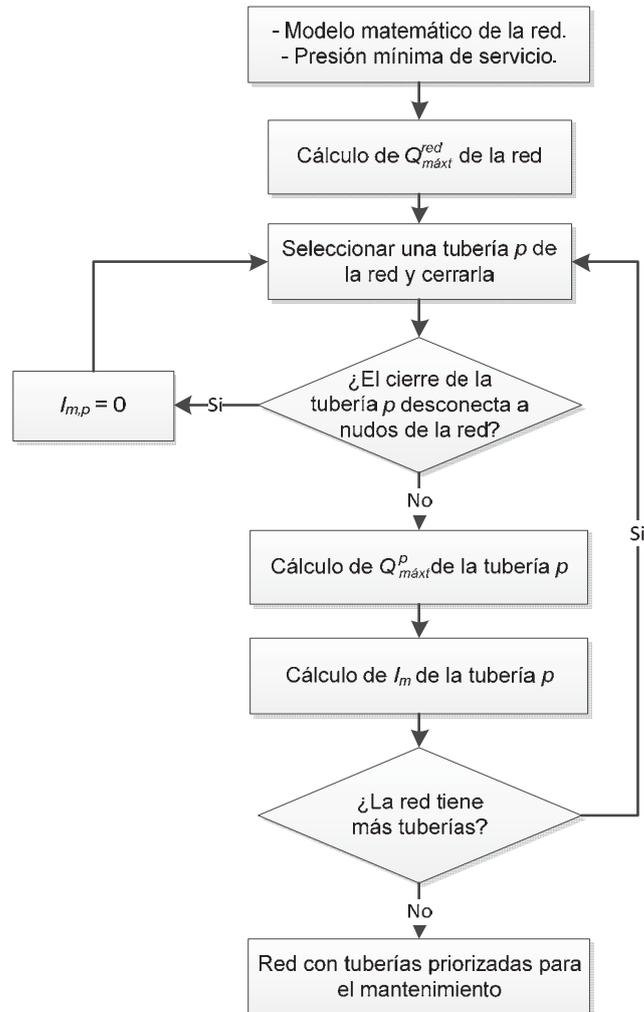


Figura 3. Diagrama de flujo para la priorización de tramos para el mantenimiento de la red

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como caso de estudio, se prioriza el mantenimiento de las tuberías del sector S01-13 de la red de suministro de agua potable de Oruro (Bolivia).

La empresa de agua potable de Oruro tiene muchos problemas económicos y logísticos, los cuales le impiden realizar una operación y mantenimiento adecuados. Esta situación

condiciona las tareas de mantenimiento de la red, por lo que se tienen problemas frecuentes de pérdida de agua.

La capacidad de la red se calculará con una presión de servicio $P_{mín} = 5$ m, debido a que es la red que conecta directamente a las viviendas de la zona, que en su mayoría son unifamiliares de menos de dos niveles. Los resultados del índice de mantenimiento para cada tramo son mostrados en la Figura 4.

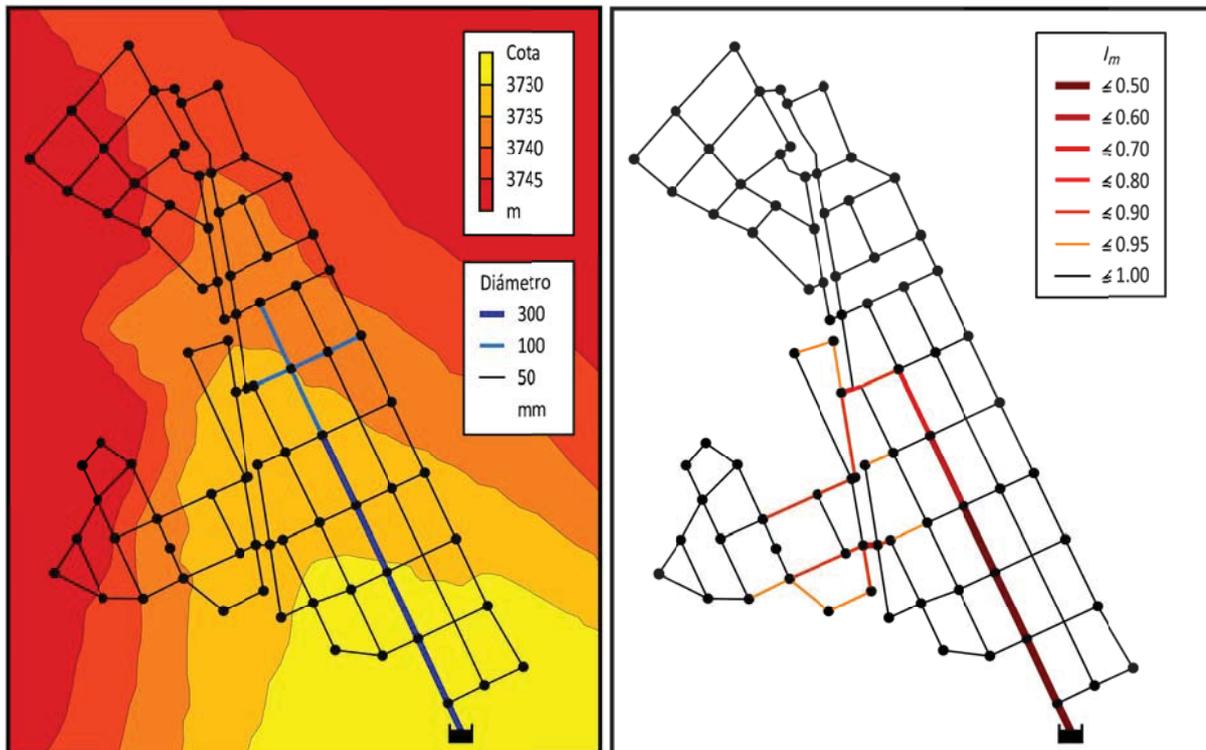


Figura 4. Mapa de prioridad en el mantenimiento de tramos de la red

Es evidente que las tareas de reparación en los tramos de alta prioridad deben ser más rápidas, pues las intervenciones de mayor duración perjudican al conjunto total de usuarios del sector.

Tras el cálculo del índice, es posible elaborar el diagrama de frecuencias acumuladas de las tuberías, basado en el índice de mantenimiento (Figura 5). En este diagrama se puede observar un punto de quiebre a partir de $I_m = 0.95$, el cual divide claramente a las tuberías que requieren priorizarse ($I_m \leq 0.95$) y aquellas que no ($I_m > 0.95$).

De esta forma, también se puede cuantificar el número de tramos o tuberías según su prioridad (Tabla 1).

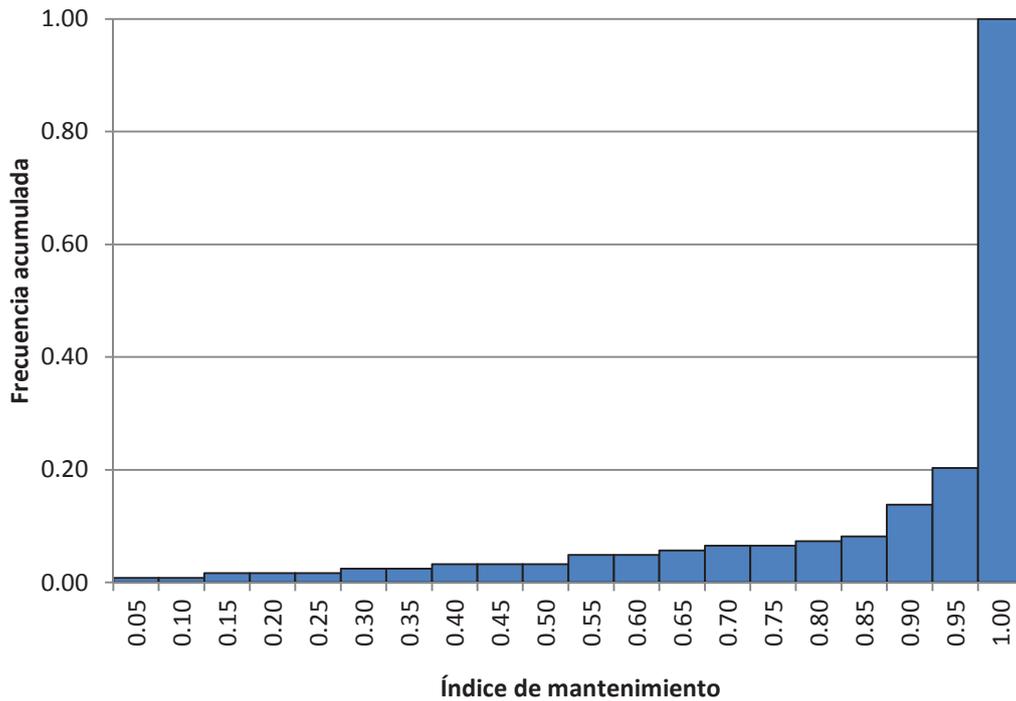


Figura 5. Frecuencia acumulada de tuberías en el sector S01-13 en base al índice de mantenimiento

Cantidad de tuberías en el sector S01-13	Índice de mantenimiento	Prioridad para el mantenimiento
4	$I_m \leq 0.50$	Alta/cuello de botella
21	$0.50 < I_m \leq 0.95$	Media
98	$I_m > 0.95$	Baja

Tabla 1. Cantidad de tuberías clasificadas según la prioridad de mantenimiento

Los primeros cuatro tramos de ingreso al sector, se constituyen en los cuellos de botella. Asimismo, es importante prestar mayor atención a los pocos tramos que conectan grandes grupos de nudos (tuberías que atraviesan transversalmente por la calle principal). La mayor parte de las tuberías priorizadas se ubican en la parte central sur del sector, por lo que los trabajos de mantenimiento preventivo deben concentrarse en esta zona.

Los resultados indican que debe priorizarse el mantenimiento del 20.32% de las tuberías del sector (25 tuberías). El restante 79.68% (98 tuberías) corresponde a tramos que reducen menos del 5% de la capacidad de la red.

4. CONCLUSIONES

La presente propuesta permite priorizar a las tuberías de la red para las actividades de mantenimiento, de esta forma se puede reducir la cantidad de tramos que deben ser inspeccionados en las tareas de mantenimiento periódico de la red.

El índice de mantenimiento y la posterior clasificación permiten identificar a las tuberías más críticas de la red, aquellas que requieren mayor atención, pues son capaces de reducir considerablemente la capacidad de la red. Asimismo, es posible reconocer a las tuberías que tienen poca relevancia en la capacidad de la red; por lo tanto, en sistemas gestionados por empresas con escasez económica, estas tuberías pueden tener un mantenimiento bajo una estrategia pasiva.

En el caso de estudio, se demuestra que es posible optimizar los recursos económicos limitados de la empresa de agua de Oruro, priorizando las tuberías por medio del índice de mantenimiento; de esta forma, este indicador se convierte en una herramienta muy útil para la planificación de las tareas de mantenimiento.

REFERENCIAS

- [1] D. Ziegler, F. Sorg, P. Fallis, K. Hübschen, L. Happich, J. Baader, R. Trujillo, D. Mutz, E. Oertlé, P. Klingel and A. Knobloch, *Guidelines for water loss reduction, A focus on pressure management*, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH and VAG Armaturen GmbH, (2012).
- [2] N. Totsuka, N. Trifunovic and K. Vairavamoorthy, *Intermittent urban water supply under water starving situations. 30th WEDC International Conference*, Vientiane, Laos (2004).
- [3] M. Yáñez, F. Joglar and M. Modarres, “Generalized renewal process for analysis of repairable systems with limited failure experience”, *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 77, n° 2, pp. 167-180, (2002).
- [4] M. B. Monte and A. T. de Almeida-Filho, “A Multicriteria Approach Using MAUT to Assist the Maintenance of a Water Supply System Located in a Low-Income Community”, *Water Resources Management*. Vol. 30, n° 9, pp. 1-14, (2016).
- [5] J.F.G. Fernández and A.C. Márquez, *Maintenance Management in Network Utilities: Framework and Practical Implementation*, Springer Science & Business Media, (2012).
- [6] P.V. Gottipati and U.V. Nanduri, “Equity in water supply in intermittent water distribution networks”, *Water and Environment Journal*. Vol. 28, n° 4, pp. 509-515, (2014).
- [7] A.E. Ilaya-Ayza, E. Campbell, R. Pérez-García and J. Izquierdo, “Network capacity assessment and increase in systems with intermittent water supply”, *Water*. Vol. 8, n° 4, p. 126, (2016).
- [8] F. Martínez, R. Vidal and M. Andrés, “La regulación de los sistemas hidráulicos”, in *Ingeniería Hidráulica aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua*, 3ª ed., vol. II, Valencia, España, ITA-UPV, (2009).
- [9] L. Rossman, *Epanet 2 - Users Manual*, Cincinnati, U.S.A.: EPA, (2000).