

## SISTEMA PILOTO PARA ESTUDIAR LA CORROSION DE METALES EMPLEADOS EN LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

### Model system to study the corrosion of metals used in drinking water distribution systems

#### RESUMEN

Un sistema piloto de distribución permite estudiar los fenómenos ocasionados por la interacción agua potable - superficie interna de la tubería, y posibilita obtener las condiciones de una red. En este trabajo, los materiales (acero al carbono, galvanizado y cobre), comúnmente empleados en redes secundarias, son utilizados con el fin de estudiar su deterioro superficial, el deterioro de la calidad del agua y los depósitos formados en la tubería. Para esto se analizan parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua; y para los metales se determinan, a diferentes tiempos de exposición, la velocidad de corrosión, crecimiento de biopelícula y productos formados.

**PALABRAS CLAVES:** Agua potable, Biopelícula, Calidad de Agua, Corrosión en agua, Formación de depósitos, Sistema piloto de tubería.

#### ABSTRACT

*A model system allows studying phenomena due to drinking water – inner surface pipe interaction, and it facilitates to get network conditions. The materials used in this paper, are often used in secondary networks (carbon steel, galvanized steel and copper), with the purpose of studying the deterioration of the pipe surface, the deterioration of water quality and deposits formed in the pipe. For this, physic-chemical and microbiological parameters of the water are analyzed; for the materials, at different exposition times, corrosion rate, biofilm growth, and by-products formed are determined.*

**KEYWORDS:** Biofilm, Corrosion by-products, Corrosion in water, Drinking water, Model system, Water quality.

#### JOHN FREDY RIOS

Ingeniero Químico  
Estudiante de Doctorado  
Universidad de Antioquia  
johnfreri@yahoo.com

#### ELIZABETH RAMÍREZ

Ingeniera Química  
Estudiante de Maestría  
Universidad de Antioquia  
eramireiq@yahoo.com

#### JORGE ANDRÉS CALDERÓN

Ph. D. en Ingeniería Metalúrgica y de Materiales  
Profesor e Investigador  
Grupo de Corrosión y Protección  
Universidad de Antioquia  
jacalder@udea.edu.co

#### FELIX ECHEVERRÍA

Ph. D. en Corrosión  
Coordinador Grupo de Corrosión y Protección  
Universidad de Antioquia  
felix.echeverría@siu.udea.edu.co

## 1. INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta la importancia que tiene el agua para la supervivencia de un país, se hace necesario que las empresas prestadoras de este servicio provean un producto de alta calidad, es por esto que se hacen grandes inversiones en infraestructura y tecnologías para tratar de lograrlo. Luego de la captación, transporte y potabilización del agua, el preciado líquido debe conducirse hasta el consumidor, para esto se requiere de una costosa infraestructura física (redes) que aseguren la entrega eficiente del producto y que mantenga las condiciones de calidad, lo cual no siempre se logra. En el proceso de distribución del agua, la superficie interna de la tubería puede deteriorarse debido a numerosos factores como son la velocidad de flujo del fluido, la temperatura, el pH, la alcalinidad, el oxígeno disuelto, las biopelículas [1,2], la dureza, entre otros. Estos promueven o inhiben algunas reacciones, al estar en contacto el metal con el agua, que producen la disolución química del material, y por ende la pérdida del metal, lo cual ocasiona alteración de la calidad del agua en el sistema de distribución, producción de sabores y olores, promoción de microorganismos perjudiciales y

patógenos, reducción de la carga útil hidráulica, rupturas de la tubería, entre otras.

Son grandes los esfuerzos y los estudios realizados para dar solución a los problemas presentados en la distribución del agua, que permitan a la vez disminuir el efecto del material de tubería sobre la calidad del preciado líquido. Diversas investigaciones realizadas al respecto se enfocan en estudiar los cambios en la calidad del agua [3], las variables que favorecen o inhiben el deterioro de la tubería y su correlación con la pérdida de material [4,5,6], la formación de biopelícula en la superficie de la tubería [7,8], entre otros. Por otro lado, se han desarrollado índices que pronostiquen la agresividad del agua [9], se han evaluado tramos de tubería mediante inspección visual e inspección detallada con equipos de laboratorio y se han analizado productos en la superficie por técnicas de caracterización. Todo esto orientado a establecer métodos para controlar la corrosión, como son el ajuste del pH, la aplicación de recubrimientos, el uso de inhibidores de corrosión y/o la implementación de materiales de tubería que sean menos propensos a la corrosión [10,11]. Adicionalmente, se hace necesario que las empresas realicen actividades de seguimiento

rutinario (según la normatividad), para evaluar las variaciones de los parámetros del agua potable entregada al consumidor, que sirve como herramienta para identificar las transformaciones que ocurren en el sistema y permiten efectuar posibles cambios en la operación del mismo. Así mismo, controlen la presión para identificar posibles puntos de fuga.

Teniendo en cuenta que el agua promueve reacciones que deterioran el material metálico de tubería y que a su vez, pueden alterar la calidad del agua durante su recorrido por el sistema de distribución, se hace necesario estudiar la interacción existente entre el agua y las diferentes tuberías metálicas utilizadas en redes de distribución, con el fin de determinar la relación entre los parámetros del agua en la corrosión de cada metal, y a su vez las repercusiones que tiene el deterioro del material sobre la calidad del agua. Para llevar a cabo un estudio sobre el tema, se implementa el montaje de un sistema piloto de tubería, debido a que permite obtener condiciones similares a las de una red de distribución de agua potable como son la condición hidráulica y la relación superficie/volumen [12].

El objetivo del presente trabajo es presentar las características seleccionadas en el diseño de un sistema piloto de tubería, que permitan estudiar los productos formados por la interacción entre el agua potable y algunos materiales metálicos de tubería empleados en redes secundarias de distribución, evaluar la corrosión del material metálico, la formación de depósitos y biopelícula en la tubería; así como, la incidencia de estos en el deterioro de la calidad del agua. Adicionalmente, exponer el procedimiento de puesta a punto del sistema piloto construido para simular las condiciones reales.

## 2. CONTENIDO

### 2.1. Sistema piloto de tubería

Un sistema piloto de tubería es el reactor más comúnmente usado para estudios de corrosión. Este es empleado para simular las condiciones de operación de sistemas de distribución de agua; teniendo la capacidad de ser implementado como un montaje independiente o ser instalado en un sistema de distribución. Además permite la realización de estudios enfocados tanto al material de tubería como al agua, así como la evaluación de modificaciones en el sistema. Algunas ventajas que tiene son: las variables que afectan la corrosión pueden ser sistemáticamente controladas y evaluadas, pueden suministrar datos acerca de la velocidad de corrosión del material, permite evaluar la formación de depósitos y biopelícula, permite determinar fluctuaciones o modificaciones de calidad del agua, posibilita estudiar tratamientos alternativos, entre otros [13].

Un sistema piloto puede presentar ciertas características definidas por los requerimientos del estudio, las cuales están relacionadas con la tubería de ensayo, con la operación hidráulica del sistema y con las mediciones de variables a lo largo del ensayo. Estas pueden ser agrupadas en las siguientes categorías: características físicas (material, diámetro y longitud de la sección de ensayo), características hidrodinámicas (configuración de flujo, tiempo de retención, velocidad de flujo y tiempo de estancación), y las técnicas que aseguren la calidad (medición de la calidad del agua y duración del estudio) [13]. A continuación se presentan las características según las tres categorías mencionadas:

Las características físicas son las relacionadas con la sección de ensayo empleada en el estudio como es el material, la longitud, el diámetro y el tramo de tubería. Los materiales empleados son normalmente los utilizados en el sistema de distribución hacia el cual se dirige el estudio. El diámetro de la tubería empleado en los estudios es generalmente uno comercial que se utilice en redes de distribución. La longitud de la tubería está determinada principalmente por el tiempo de contacto y la velocidad de flujo, la cual puede componerse de tramos cortos para analizar la formación de depósitos o la acumulación de biopelícula durante el ensayo, e igualmente se emplean extensas longitudes, para evaluar las variaciones en los parámetros del agua y la disolución de especies químicas desde la superficie interna del material de tubería durante su recorrido a través del sistema.

En las condiciones hidráulicas se consideran la velocidad de flujo, el tiempo de retención y la configuración de flujo del fluido de la sección de ensayo. La velocidad de flujo se elige según las condiciones a simular. Cuando se contemplan condiciones de flujo normal en un sistema de distribución, la velocidad de flujo simulada es 0,3 m/s y se emplean valores inferiores para el caso de estudio en zonas de estancamiento o puntos terminales. El tiempo de retención es elegido basado en el tiempo que puede permanecer el agua en el sistema de distribución simulado; además, no debe ser muy prolongado debido a la elevada disminución que presentan algunos parámetros del agua como es el oxígeno disuelto y el cloro residual. La configuración de estos dispositivos es flexible y su clasificación se puede realizar por la configuración de flujo, la cual puede ser a través del sistema con un solo paso del fluido o por recirculación; esta última permite independizar el tiempo de retención del agua de la velocidad de flujo y de la longitud de tubería.

Los muestreos del agua son realizados para determinar su agresividad y analizar la variación de su calidad en un sistema de distribución, la frecuencia del muestreo se define según el estudio y generalmente es de 1 a 3 veces por semana [14,15]. La biopelícula se analiza principalmente para determinar la cinética de crecimiento dentro del sistema, identificar las especies que son

perjudiciales para la salud humana y/o que causan biocorrosión [16] ; su muestreo se realiza semanalmente [17] o mensualmente [18]. Con relación al tiempo del estudio, éste normalmente se extiende por un año para el caso de evaluación de la corrosión de los materiales metálicos y la formación de biopelícula en el sistema de distribución.

### 2.2. Descripción del Sistema Piloto

Un estudio a escala piloto se está realizando en la Sede de Investigación Universitaria de la Universidad de Antioquia, empleando el agua potable, suministrada por la empresa de acueducto municipal, para determinar la corrosión de tuberías metálicas empleadas en redes secundarias de distribución de agua potable. Para esto, cuatro pilotos de tubería son usados en paralelo para ensayar cada uno de los tres materiales metálicos, con un sistema adicional de PVC que sirve como blanco (ver Figura 1). Cada sistema piloto consiste de una tubería con 3 m de longitud total del metal de estudio con un diámetro nominal de 0,0254 metros, el cual incluye siete tramos cortos de 0,05 m acoplados mediante uniones universales. La tubería se enlaza en ambos extremos a tubería de PVC, la cual presenta varios cambios de dirección de flujo que permiten ubicar cupones de corrosión con un tamaño de 0,013 por 0,076 por 0,0016 m para evaluar la velocidad de corrosión por el método de pérdida de masa [19]. Finalmente, el circuito se cierra con tubería de PVC en la cual está instalada una bomba para recirculación, un medidor de flujo, una válvula de muestreo y un conjunto de válvulas que posibilita adecuar la operación del sistema. Un esquema completo del sistema piloto dispuesto se ilustra en la Figura 2 y algunos puntos importantes se detallan en la Figura 3.



Figura 1. Sistema experimental de pilotos de tubería.

Las características del sistema se presentan en la Tabla 1, las cuales fueron seleccionadas luego de una revisión de la literatura científica y de las variables del estudio.

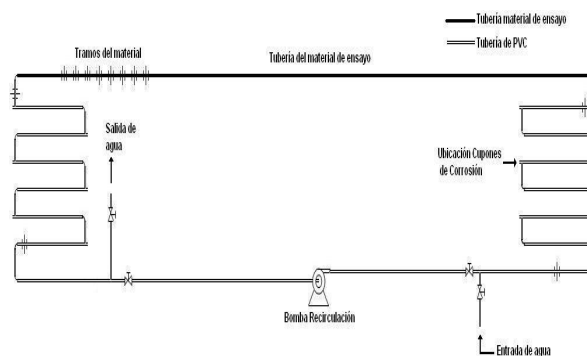


Figura 2. Esquema del sistema piloto de tubería.

Característica	Descripción
Materiales de Tubería	Acero al carbono, Galvanizado, Cobre, PVC (como blanco)
Longitud total de tubería metálica	3 m
Diámetro nominal	0,025 m
Velocidad de flujo	0,3 m/s
Operación del sistema	<ul style="list-style-type: none"> <li>Flujo a través (normalmente),</li> <li>Recirculación (casualmente, para los muestreos)</li> </ul>
Tiempo del ensayo	1 año
Frecuencia de muestreo del agua	<ul style="list-style-type: none"> <li>Semanalmente (parámetros fisicoquímicos)</li> <li>Mensualmente (parámetros microbiológicos, metales en el agua)</li> </ul>
Evaluación de la superficie interna de tubería	½, 1, 3, 6, 9 y 12 meses
Velocidad de corrosión	1, 3, 6 y 12 meses

Tabla 1. Especificaciones del sistema piloto.

El sistema piloto puede operar con flujo a través o con recirculación del fluido. La primera, un solo paso del fluido, es la configuración de flujo normal empleada para tener en contacto la superficie interna de la tubería metálica con el agua; la segunda, la recirculación, se emplea para brindar un tiempo de contacto prolongado que permita evaluar las variaciones en los parámetros del agua. La adecuación del sistema para que opere en cualquiera de las dos configuraciones se logra mediante un conjunto de válvulas. En el montaje no se emplea un tanque depósito para la recirculación, para evitar que el agua tenga un tiempo de estancación.

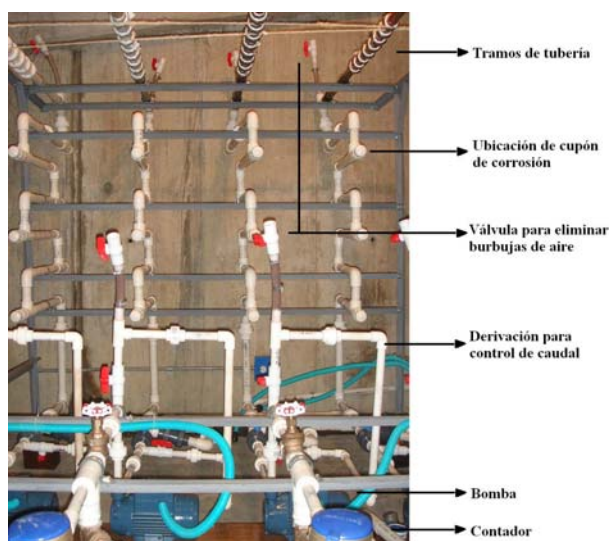


Figura 3. Detalles del Sistema experimental de tubería.

Los tramos de tubería metálicas ubicados en cada sistema piloto son retirados a diferentes tiempos a lo largo del ensayo para analizar el ataque al material y la formación de depósitos y biopelícula. Por otro lado, la velocidad de corrosión de cada metal de estudio se realiza por el retiro de cupones de corrosión para cada tiempo de análisis.

Finalmente, la variación de la calidad del agua se analiza evaluando algunos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua, que presentan cambios apreciables a lo largo de un sistema de distribución y pueden estar asociados con el deterioro del material de tubería como son temperatura, pH, conductividad, potencial redox, cloro residual libre, Oxígeno disuelto, alcalinidad, color, turbiedad, sólidos disueltos totales, sólidos fijos, hierro disuelto, cobre disuelto, heterótrofos totales, coniformes totales, *E.Coli*.

### 2.3. Puesta a punto

El proceso para dar marcha al estudio en el piloto de tubería se inicia con los procesos de llenado, lavado preliminar, desinfección y lavado final del sistema, estos se realizan para garantizar que las condiciones iniciales del material metálico de estudio estén libre de depósitos y microorganismos y se pueda determinar adecuadamente estos productos que se forman en la tubería por el contacto con el agua durante el tiempo de ensayo. El llenado del sistema con agua se realiza a una velocidad no menor de 0,3 m/s, en la cual se debe asegurar que las burbujas de aire sean eliminadas dejando pasar el agua por un tiempo de 1 hora. La etapa de lavado preliminar consiste en hacer pasar agua en la tubería a una velocidad no inferior a 0,76 m/s que permita remover el material particulado que se encuentre presente en el sistema. El proceso de desinfección consiste en hacer pasar una solución de hipoclorito con una concentración mayor a 100mg/l de cloro por un tiempo de 3 horas. Finalmente, se extrae el agua con cloro del sistema y mediante lavado

con chorro de agua se elimina el agua con cloro que permanezca remanente en las paredes, hasta que la concentración del cloro en el agua que sale de la línea es similar a la que prevalece en el sistema [20,21]. Los procesos de lavado se realizan con flujo a través mientras el de desinfección se realiza con flujo en recirculación. Por último, se realizan muestreos al interior de la tubería para garantizar que quedó libre de microorganismos.

El flujo volumétrico de agua en el montaje es controlado por una válvula de globo ubicada en la línea de suministro, de la cual se realiza la derivación para cada uno de los cuatro sistemas y cada una de estas ramas presenta adicionalmente una válvula que permite ajustar el suministro de agua para obtener la velocidad de flujo requerida. Para el caso de la recirculación del agua, el caudal se controla mediante una derivación a la descarga de la bomba, la cual retorna a la línea de succión de la misma. En ambos casos, el control de flujo se realiza mediante un contador volumétrico, ubicado en la línea de tubería de PVC, el cual posibilita registrar el caudal acumulado de agua que circula en el sistema.

La configuración de flujo del sistema se modifica mediante el siguiente proceso: cuando el flujo de agua es a través, el proceso de recirculación se implementa mediante el llenado total de la tubería que permita eliminar el aire en la succión y descarga de la bomba, posteriormente se aísla completamente el sistema y se enciende el equipo de bombeo. Cuando se cambia nuevamente a flujo de agua a través, el agua al interior del sistema es retirada y se procede inmediatamente a abrir la válvula de alimentación para realizar el llenado de la tubería y finalmente se permite la continua renovación del agua abriendo la válvula de descarga del sistema.

### 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las características de diseño del sistema piloto de tubería presentado se derivan de una revisión bibliográfica que permitió establecer los valores de las variables físicas e hidráulicas, así como la frecuencia de muestreo del agua, productos de corrosión y biopelícula.

El sistema piloto se construye para estudiar los productos derivados de la interacción entre el agua potable y la tubería metálica, en especial la evaluación de la corrosión de los materiales metálicos de tubería, los depósitos y biopelícula formados en la superficie y el deterioro de la calidad del agua.

La importancia de hacer este tipo de ensayos está en que permite estudiar las interrelaciones existentes entre los factores que provocan el deterioro del material, y que a su vez provocan el deterioro del agua; de igual manera, hacer recomendaciones sobre los materiales adecuados que se pueden utilizar para hacer los reemplazos en los sistemas de distribución.

Es importante caracterizar los productos de corrosión formados en la superficie interna de la tubería pues estos son causantes de olores y sabores en el agua, que podrían ser causa de quejas por parte de los usuarios.

Las biopelículas que se pueden formar dentro de la superficie interna de los materiales pueden causar deterioro del material o biocorrosión y/o albergar dentro su estructura organismos patógenos causantes de enfermedades en los seres humanos.

El proceso de puesta a marcha se realiza para garantizar que la superficie interna de tubería se encuentre, inicialmente, ausente de productos de corrosión, depósitos y biopelícula, que son el objeto de estudio.

#### 4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. M. Critchley, N. J. Cromar, N. McClure, and H. J. Fallowfield, "Biofilms in copper plumbing systems: Sensitivity to copper and chlorine and implications for corrosion," *Water Science and Technology: Water Supply*, vol. 2 (4), pp. 81-87, 2002.
- [2] J. Menaia, and E. Mesquita, "Drinking water pipe biofilm: Present knowledge, concepts and significance," *Water Science and Technology: Water Supply*, vol. 4 (2), pp. 115-124, 2004.
- [3] M. J. Lehtola, I. T. Miettinen, M. M. Keinänen, T. K. Kekki, O. Laine, A. Hirvonen, T. Vartiainen y P. J. Martikainen, "Microbiology, chemistry and biofilm development in a pilot drinking water distribution system with copper and plastic pipes," *Water research*, vol. 38, pp 3769-3779, Oct. 2004.
- [4] N. Boulay and M. Edwards, "Role of temperature, chlorine, and organic matter in copper corrosion by-product release in soft water," *Water research*, vol. 35, pp 683-690, Feb. 2001.
- [5] S. Takasaki and Y. Yamada, "Effects of temperature and aggressive anions on corrosion of carbon steel in potable water," *Corrosion Science*, vol. 49, pp 240-247, Jan. 2007.
- [6] Z. Tang, S. Hong, W. Xiao and J. Taylor, "Impacts of blending ground, surface, and saline waters on lead release in drinking water distribution systems," *Water research*, vol. 40, pp 943-950, Mar. 2006.
- [7] P. J. Ollos, P. M. Huck and R. M. Slawson, "Factors affecting biofilm accumulation in model distribution systems," *Journal / American Water Works Association*, vol. 95, pp. 87-97, Jan. 2003.
- [8] A. C. Martiny, T. M. Jorgensen, H. J. Albrechtsen, E. Arvin, and S. Molin, "Long-Term Succession of Structure and Diversity of a Biofilm Formed in a Model Drinking Water Distribution System," *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 69, pp. 6899-6907, Nov. 2003.
- [9] R. W. Lane, *Control de Incrustaciones y corrosión en instalaciones hidráulicas de edificios*, Mexico. McGraw-Hill, 1995, p.53-60.
- [10] EPA, Office of Research and Development, Seminar Publication: Control of biofilm growth in drinking water distribution systems, EPA/625/R-92/001, Washington DC 20460, Jun. 1992. [Online]. Available: <http://www.p2pays.org/ref/15/14291.pdf> (Consultada: julio 19 de 2007)
- [11] K.D. Martel, G.J. Kirmeyer, B.M. Murphy, P.F. Noran, L. Kirby, T.W. Lund, J.L. Anderson, R. Medhurst and M. Caprara, "Preventing water quality deterioration in finished water storage facilities", *Journal AWWA*, Vol. 94, No. 4 pp. 139-148, April 2002.
- [12] R. Boe-Hansen, "Microbial growth in drinking water distribution systems," Ph.D. dissertation, Environment & Resources DTU, Technical University of Denmark, 2001. [Online]. Available: <http://www.er.dtu.dk/publications/fulltext/2001/MR2001-075.pdf> (Consultada: julio 23 de 2007)
- [13] J. D. Eisnor. G. A. Gagnon, "A framework for the implementation and design of pilot-scale distribution systems," *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, vol.52, pp. 501-519, Nov. 2003.
- [14] A. Imran, J. D. Dietz, G. Mutoti, J. S. Taylor and A. A. Randall, "Modified Larsons Ratio Incorporating Temperature, Water Age, and Electroneutrality Effects on Red Water Release," *Journal of Environmental Engineering*, Vol.131, pp 1514-1520, Nov. 2005.
- [15] M. J. Lehtola, I. T. Miettinen, T. Lampola, A. Hirvonen, T. Vartiainen y P. J. Martikainen, "Pipeline materials modify the effectiveness of disinfectants in drinking water distribution systems," *Water Research*, Vol.39, pp 1962-1971, May 2005.
- [16] P.J. Bremer, B.J. Webster and D.B. Wells, "Biocorrosion of copper in potable water", *Journal AWWA*, Vol. 93, N° 8, pp 82-91, Aug. 2001
- [17] C. D. Norton y M. W. Lechevallier, "A Pilot Study of Bacteriological Population Changes through Potable Water Treatment and Distribution," *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 66, pp 268-276, Jan. 2000.
- [18] B. Holden, M. Greetham, B. T. Croll and J. Scutt, "The Effect of changing inter process and final disinfection reagents on corrosion and biofilm growth in distribution pipes," *Water Science and Technology*, Vol.32, pp 213-220, Aug. 1995..
- [19] ASTM International, Standard Test Methods for Corrosivity of Water in the Absence of Heat Transfer (Weight Loss Methods), Designation ASTM D2688, 2005.
- [20] ICONTEC, Desinfección de líneas principales para la conducción de agua, NTC 4246, Sep. 1997.
- [21] AWWA, AWWA Standard for disinfecting water mains, ANSI/AWWA C651-92, 1992.