

SIMULACIÓN DE UN LAVADO HIDRÁULICO EN TUBERÍAS PARA EL CONTROL DEL CRECIMIENTO DE BIOPELICULA

HYDRAULIC FLUSHING MODELING IN PIPES TO CONTROL OF BIOFILM GROWTH

LUIS F. CARVAJAL

Profesor Universidad Nacional de Colombia, e-mail: lfcarvaj@unalmed.edu.co

ALEJANDRA GÓMEZ

Ingeniera Civil Universidad Nacional de Colombia

SANTIAGO OCHOA

Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia

Recibido para revisar 27 de Abril de 2006, Aceptado 10 de Octubre de 2006, Versión final 26 de Octubre de 2006

RESUMEN: Este artículo presenta un problema actual y de gran importancia en los sistemas de acueducto, el cual es la biopelícula que se desarrolla al interior de las paredes de las tuberías y que puede presentar problemas en la calidad del agua y predisposición de los usuarios respecto al servicio público que se presta. Se presenta una revisión de los mecanismos físicos que la generan y el control de la biopelícula en tuberías mediante el Lavado Hidráulico. En este caso se hace una simulación hidráulica aplicada a una red que permite conocer si se tienen zonas propensas a la formación de la biopelícula, considerando parámetros de velocidad de flujo y tiempo de permanencia de la zona en condiciones críticas. Se puede estimar si las presiones y velocidades obtenidas están en el rango aceptado por el ente regulador del servicio. Además, se pueden definir criterios de simulación y operación en una red para el control de la biopelícula.

PALABRAS CLAVE: Biopelícula, Lavado Hidráulico, Lavado Hidráulico Unidireccional, acueducto, operación de acueductos, control de biopelícula.

ABSTRACT: The biofilm is associated to water distribution system. It generates serious problems in the water quality and users complaints. This job presents a review of physical processes that origin biofilm and its control by flushing. Simulating different sceneries in pipe networks can define what zones have a major formation rate of biofilm than others. The parameters had into account are: pressure, flow velocity and permanency time of zone on critical conditions. The simulating can help to define if pressure and flow velocity are in an operative range according to policy authorities and have hydraulic operation criteria in a pipe network to control the biofilm growth.

KEY WORDS: Biofilm, Hydraulic flushing, Unidirectional flushing, water intake system, water network operation, biofilm control.

1. INTRODUCCION

La biopelícula (biofilm) se compone de comunidades de microorganismos que se

desarrollan entre una fase sólida y líquida en forma natural o artificial. La presencia de estas comunidades genera un efecto negativo en los acueductos ya que brindan protección a organismos patógenos que potencialmente pueden llegar a afectar la salud humana. En la

actualidad muchos sistemas de abastecimiento de agua potable en el mundo presentan esta situación y por lo tanto es recomendable realizar estudios que permitan desarrollar las acciones necesarias para controlar este fenómeno.

La presencia y formación de la biopelícula en tuberías depende de la interacción de factores como: disponibilidad de nutrientes, condiciones de flujo, temperatura, tipo de superficie y el efecto de las partículas (*Melo and Bott, 1997*). Básicamente la corrosión de la tuberías favorece en mayor o menor medida el crecimiento de la biopelícula, así como la presencia de microorganismos según el tipo de tratamiento de la plantas de potabilización y los nutrientes presentes en el agua: De igual forma el diseño y operación del sistema de distribución de agua es fundamental, ya que hay condiciones de dinámica de flujo que favorecen el crecimiento de ésta. Una de las acciones para el control de este fenómeno, es el lavado interior de las tuberías que transportan el agua potable. El objetivo general de este artículo es mostrar mediante la simulación hidráulica de la red de distribución, las técnicas de Lavado Hidráulico (*LH*) y Lavado Hidráulico Unidireccional (*LHU*) como herramienta para el control del crecimiento y desprendimiento de la biopelícula en tuberías. Existen otras técnicas para el lavado interior de las tuberías, tales como el control con mecanismos físicos (pigs) y control con sustancias químicas (biocidas). Se ha encontrado que la técnica de *LH* y en especial el *LHU* es competitiva desde el punto de vista económico y de implementación en el campo (*Emde et al, 1988*). La simulación hidráulica permite establecer algunos criterios para la detección de zonas de formación potencial de la biopelícula en sistemas de acueducto, establecer políticas de operación para la red de distribución de agua y definir las acciones para realizar un Lavado Hidráulico. De esta manera, se logran orientaciones de tipo hidráulico que permiten el control de la formación y crecimiento de la biopelícula y se identifican aquellos tramos de tuberías de la red donde ésta se puede formar con mayor facilidad, para posteriormente desarrollar el procedimiento de Lavado Hidráulico en una red de tuberías, acompañado

de las respectivos conclusiones y recomendaciones.

2. QUÉ ES LA BIOPELÍCULA Y CUÁLES FACTORES AYUDAN A SU FORMACIÓN EN TUBERÍAS?

Simplemente la biopelícula (biofilm en inglés) es un conjunto de microorganismos de una o varias especies (hongos, algas, protozoarios, desechos y corrosión) rodeados por el limo que secretan, unidos a una superficie inerte o viva. La biopelícula existe en cualquier superficie que entre en contacto con el agua o con algún medio líquido y se forma cuando las bacterias se adhieren a las superficies en ambientes acuosos y comienzan a expeler una sustancia como pegamento que se adhiere a todas las clases de materiales tales como: metales, plásticos, partículas de suelo etc (*CBE, 1999-2003*)

La biopelícula se desarrolla a partir de un acondicionamiento superficial con restos orgánicos en la interfase agua-sólido que neutraliza la energía del fluido. Posteriormente se presenta la adherencia de bacterias llamadas pioneras dentro de la capa límite de la tubería, inicialmente por adsorción y luego por adsorción reversible (atracción electrostática y fuerzas físicas). Las bacterias de la biopelícula excretan sustancias poliméricas extracelulares o polímeros pegajosos (limo), las cuales atrapan y cementan las nuevas bacterias a la pared de la tubería. Además, los filamentos del polímero atrapan los escasos alimentos y protegen las bacterias contra sustancias tóxicas. Luego otras células microbianas llamadas "colonizadoras secundarias", a través del alojamiento físico y la interacción electrostática, metabolizan los desperdicios de las colonizadoras primarias, así como el producto de sus propios desperdicios y que otras células después utilizarán alternadamente. La biopelícula madura, es como un tejido vivo adherido a la superficie de la tubería. Es un complejo metabólico, una comunidad compuesta de diversas especies, cada vida es un micronicho modificado por condiciones particulares. Las biopelículas maduras se pueden describir como "ciudades del limo". El desarrollo de una biopelícula madura puede llevar varias horas o varias semanas,

dependiendo del agente que origine su adhesión: tipo de tratamiento del agua, las condiciones de operación del sistema, la velocidad del flujo, etc (*Edstrom, 2002; Charaklis, 1990; Mittelman, 1985; Schaule, G. y H. Fleiming, 1991*). Un resumen de las etapas de formación de la biopelícula es: transferencia de masa de las macromoléculas a la superficie y formación de la capa, transporte de microorganismos a la capa, adhesión irreversible de las células a la superficie, desarrollo de estructura de dependencia entre las células y la superficie, transferencia de nutrientes hacia la superficie a través de la biopelícula y hacia afuera de la capa, metabolismo celular generando nuevas células y polímeros extracelulares y desprendimiento de biopelícula cuando esta ha alcanzado un espesor crítico.

Dentro de los factores que favorecen el desarrollo de la biopelícula están: cualquier tipo de material favorece el desarrollo de ésta, el acero inoxidable es tan susceptible como la tubería plástica. Aunque las superficies más lisas, retrasan la acumulación inicial de bacterias, la suavidad no parece afectar perceptiblemente la cantidad total de la biopelícula que se unirá a una superficie (*Flemming y Geesy, 1990, Pedersen, 1990*). En otros estudios se ha encontrado que hay un 35 % menos de formación de biopelícula en materiales lisos como el vidrio comparado con el acero (*Melo and Bott, 1997*). También el área superficial es determinante para la formación de la biopelícula, a mayor área superficial, mas espacio para la aglomeración de las bacterias. La temperatura es importante en la formación de biopelícula y se ha encontrado que cuando un fluido aumenta de 35° a 40 °C el espesor de la biopelícula aumenta en un 80%, esto para procesos de remoción de bacterias en residuos líquidos. En cuanto a las variables de tipo hidráulico los valores altos de velocidad no evitan la formación y crecimiento de la biopelícula pues su desarrollo se realiza en la capa límite o subcapa laminar del fluido (*Mittelman, 1985; Patterson, 1991; Meltzer, 1994; Sly, L. I. y V. Arunpairojana, 1998*). En general los cambios hidráulicos se reflejan en un incremento en la resistencia friccional que se

caracteriza por un período inicial de aumento bajo en el espesor de la biopelícula, seguido por un aumento rápido después de que el espesor alcanza un valor crítico correspondiente al espesor de la subcapa laminar. La disminución del diámetro efectivo de la tubería corresponde al 10% del efecto de la resistencia friccional. El efecto del número de Reynolds en el factor friccional para un tubo con biopelícula es similar a un tubo con una superficie rugosa en un rango de número de Reynolds de 5000 a 48000. Estos resultados fueron la conclusión del trabajo de *Picologlou, 1980* en un reactor que simula las condiciones de formación de la biopelícula.

Se han calculado diferentes espesores de la subcapa laminar que van de 582 a 34 micrones, para diámetros de 0,4 a 4 pulgadas de tubería y velocidades de 0,06 a 3,6 m/s (*Pittner, 1988*). Además, *Pittner* encontró que los esfuerzos cortantes dentro de la subcapa laminar son mucho menores que los requeridas para desalojar una célula de la biopelícula.

También es importante tener en cuenta que la escasez de los alimentos necesarios para el desarrollo de las bacterias, limitará su crecimiento y reproducción. Bajo condiciones perfectas de crecimiento, una célula bacteriana se divide en dos células hijas (*Harfst 1992*), pero ésta tasa de crecimiento nunca se observa realmente (en agua potable) porque son limitadas por el espacio y los alimentos disponibles. Las bacterias aerobias cerca de la superficie externa de una biopelícula consumen oxígeno, si la biopelícula es bastante densa, el oxígeno será agotado en la superficie de la tubería y se crea un ambiente anaerobio (*Costerton, 1995 y 2000*). Las contracciones tales como empalmes de tuberías y empalmes roscados son puntos más probables para tener zonas anaerobias.

3. MÉTODOS DE LIMPIEZA Y CONTROL DE LA BIOPELÍCULA

La biopelícula se puede controlar con tratamientos físicos, mecánicos y químicos (*Mittelman, 1986*). Este trabajo se centra

específicamente en el lavado hidráulico como mecanismo de limpieza físico.

El Lavado Hidráulico (*LH*), o flushing en inglés, es una de las técnicas disponibles para mejorar la calidad del agua y la capacidad hidráulica del sistema de distribución de un acueducto, quitando la arena, los sedimentos, y la biopelícula de las paredes de la tubería. Generalmente los programas de *LH* se han establecido como medidas correctivas, dando respuesta a quejas del usuario después de que se han hecho reparaciones o instalaciones, para expeler los contaminantes introducidos inadvertidamente en el sistema o como práctica de mantenimiento preventivo. Además, el *LH* no tiene un efecto duradero y debe ser repetido periódicamente. El *LH* convencional está definido como la apertura de hidrantes en un área específica durante un tiempo determinado, hasta conseguir que el agua de salida sea de la calidad deseada. Algunos de los parámetros que determinan el tiempo de abertura son la detección del desinfectante residual y reducción de la turbidez y el color. Para diseñar un programa de *LH* se deben considerar, previamente los siguientes aspectos como: localización de válvulas de desagüe en puntos de baja presión y en los puntos muertos para permitir la remoción de sedimentos. Localizar los hidrantes y válvulas donde el consumo sea mínimo y en lo posible diseñar o tener un sistema de distribución con suficiente capacidad hidráulica, que permita transportar el agua a altas velocidades y altas presiones (1.5 m/s y 140 KPa). El *LH* permite la restauración de residuos desinfectantes y la expulsión de alguna parte del agua de calidad pobre en un área específica del sistema. Como resultados posteriores al *LH* se presentan quejas crecientes del cliente, pérdida considerable de agua, mejoras mínimas y de poca duración en la calidad del agua y potencial incremento de los coliformes después de este tipo de limpieza (*Antoun, 1995*).

El Lavado Hidráulico Unidireccional (*LHU*) es un método mejorado del *LH* convencional. Consiste en la separación de una sección particular creando un circuito por cierre de válvulas y la apertura de hidrantes en una forma organizada, llevando a cabo una secuencia que

se inicia con la apertura de áreas cercanas a la planta o el área de abastecimiento de agua de interés hasta cubrir todos los alrededores; iniciando en diámetros grandes hasta llegar a diámetros pequeños; siempre de secciones limpias hasta secciones con presencia de biopelícula. El *LHU* se lleva a cabo a velocidades de aproximadamente 1.8 m/s, las cuales pueden ser adecuadas para el retiro de la biopelícula y de los productos de la corrosión y otros desechos unidos a las paredes de la tubería. De acuerdo con la velocidad alcanzada, se pueden obtener varios objetivos en la calidad del agua, ver tabla 1.

Tabla 1. Relación de velocidad y alcances del Lavado Hidráulico (*Friedman, 2002*)

Table 1. Relationship between velocity and hydraulic flushing performance (*Friedman, 2002*)

VELOCIDAD (m/s)	CARACTERÍSTICAS DE LIMPIEZA
< 0.9	Arrastra lógamo, sedimentos y se reduce la demanda de desinfectante
1.5	Elimina la biopelícula y se reduce la demanda de desinfectante
1.8	Transporta arenas en tuberías
4.0	Elimina la arena de sifones invertidos

Las ventajas del *LHU* (*Antoun, 19995*) con respecto al *LH* son: se puede llegar a ahorrar hasta un 40% de agua (*Oberoi et al, 1997*) y se estandarizan procedimientos para comparar con *LHU* futuros.

La ejecución de un *LHU* tiene un conjunto de etapas que deben ser realizadas para cumplir con la limpieza:

1. Examinar el sistema de distribución por medio de planos y modelos para conocer la hidráulica del sistema. Es óptimo contar con un modelo calibrado

2. El sistema puede ser dividido en circuitos independientes. Esta configuración evita tener que mantener válvulas cerradas por largos periodos de tiempo. Entre menor sea la longitud del tubo al que se le aplica el vaciado mucho mejor, logrando minimizar las pérdidas de presión.
3. Se determina la velocidad de flujo de acuerdo al diámetro del tubo (*ver tabla 2*). Por razones prácticas, la velocidad óptima para realizar el *LH* debe ser de 1.8 m/s. Sin embargo, con el *LHU* se pueden utilizar diversas velocidades, dependiendo de los objetivos en la calidad del agua y de los beneficios deseados en el sistema

Tabla 2. Requerimientos de caudal e hidrantes para producir una adecuada velocidad (*Antoun, 1999*)

Table 2. Requests of discharge and hydrants to get an adequated velocity

DIÁM. DEL TUBO Pulg. (mm)	CAUDAL (m ³ /h)	NUMERO HIDRANTES (60 mm)	NUMERO HIDRANTES (100 mm)
4(100)	50	1	-
6(150)	120	1	-
8(200)	210	-	-
10(250)	330	2	1
12(300)	460	2	1
16(410)	850	3	2
18(460)	1080	-	2
24(610)	1920	-	3

4. Desarrollar una guía que especifique minuciosamente la apertura y cierre de válvulas e hidrantes controlando la operación con un mapa individual (Sistema de Información Geográfico o impresos).
5. Realizar las reparaciones necesarias en las tuberías, válvulas e hidrantes.
6. Se recomienda realizar el *LHU* durante altas horas de la noche y muy temprano en la mañana (11 pm-5 am), para evitar inconvenientes con los consumidores y además tener un promedio alto de presión.

7. La seguridad es de gran importancia durante la ejecución del *LHU*; en lo que se refiere a los equipos, personal técnico y público en general. Este riesgo se incrementa cuando se usan velocidades mayores o iguales a 1.8 m/s.

Los parámetros a monitorear son: turbiedad, desinfectante residual, color, productos de la corrosión y otros parámetros de interés específico (*Chadderton et al, 1992; Pizzi, 1996*).

4. SIMULACIÓN DEL LAVADO HIDRÁULICO EN UNA RED DE ACUEDUCTO

Para llevar a cabo las simulaciones se utilizó una red de acueducto conformada por 133 nodos, 132 tubos y 7 válvulas reductoras de presión que sirven además para delimitar las 8 zonas en que se puede dividir el sistema, ver figura 1. Los materiales de las tuberías son en mayor cantidad de PVC y en menor cantidad de hierro dúctil y acero.

La curva de demanda diaria del sistema se caracteriza por un máximo entre la 8-10 horas y un mínimo entre las 22 y 2 a.m. con un valor promedio de 0.96 l/s.

Las simulaciones se realizan bajo dos tipos de escenarios que representan las condiciones extremas de operación de la red. A partir de una simulación extendida de 24 horas se determina las condiciones hidráulicas de escenario de demanda alta, el cual implica altas velocidades en las tuberías y presiones bajas en el período de las 8 a las 10 horas. Un segundo escenario es el de demanda baja que implica velocidades de flujo bajas y presiones altas en el período de las 22 a las 2 a.m. horas.

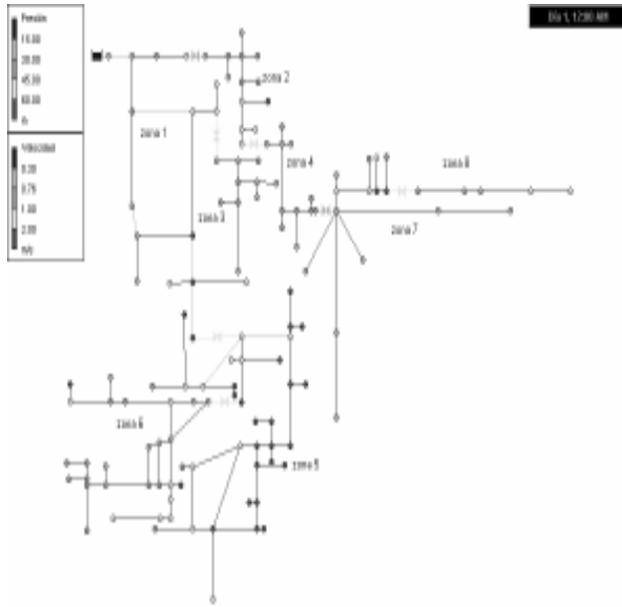


Figura 1. Sistema de la red de acueducto con presiones y velocidades a las 12 a.m.

Figure 1. Water network with pressures and velocities at 12 am

A partir de los escenarios definidos y considerando criterios de carácter hidráulico que permiten definir la posibilidad de presencia y formación de biopelícula se pueden determinar las zonas críticas de la red. El criterio a tener en cuenta en una zona con baja tasa de formación de biopelícula es: garantizar una velocidad mínima en el sistema de 0.76 m/s (Pizzi, 1996) y un valor mínimo de cloro residual en la red comprendido entre 0.2 y 1.0 mg/l (Ministerios de salud de Colombia).

El comportamiento hidráulico de la red para el escenario de demanda alta presenta velocidades menores de 0.8 m/s en 51% los tubos. Las velocidades restantes están entre 0.8 m/s y un máximo de 4 m/s. Las presiones están entre 15 y 30 mca en el 38% de los nodos y en un rango de 30 a 60 mca en un 50%. Las concentraciones de cloro están en el rango exigido. El tiempo de permanencia del agua en una zona está en 1.6 y 2.2. horas en el 54 % de la red. En el caso de demanda baja se tiene que para el 81% de los tubos la velocidad es menor de 0.2 m/s y en el restante 19% la velocidad está entre 0.2 y 0.6 m/s. En cuanto a las presiones en los nodos un 67% está en el rango de 16 a 56 mca y el restante

33% presenta problemas ya que supera el límite de 60 mca con valores entre 56 y 88 mca. El valor límite superior de 60 mca es parámetro de operación de la red. Las concentraciones de cloro están en el rango exigido. El tiempo de permanencia del agua está entre 1.4 y 2.4 horas en un 72% de la red.

De acuerdo a los resultados anteriores y teniendo en cuenta los criterios hidráulicos para la formación de biopelícula, se definieron las siguientes zonas como críticas y potenciales para realizar la simulación del LH. En el escenario de demanda baja las zonas críticas son: 3, 5, 6, 7 y 8 y en el escenario de demanda alta las zonas críticas son: 5, 6, 7 y 8. En cuanto al tiempo de permanencia de una zona en estado crítico las zonas 5, 6, 7 y 8 siempre están en condición crítica, las zonas 1 y 2 tienen 8 horas, la zona 3 tiene 18 horas y la zona 4 tiene 14 horas.

4.1 Lavado Hidráulico de las zonas 7 y 8.

Se presenta la simulación del LH de las zonas 7 y 8 ya que en estas se tienen la condición hidráulica de velocidad críticas durante las 24 horas.

- Lavado Hidráulico, zona 7, tramo 6: P4014- P4015- P4018- P4019 (Figura 2 y Tabla 3)

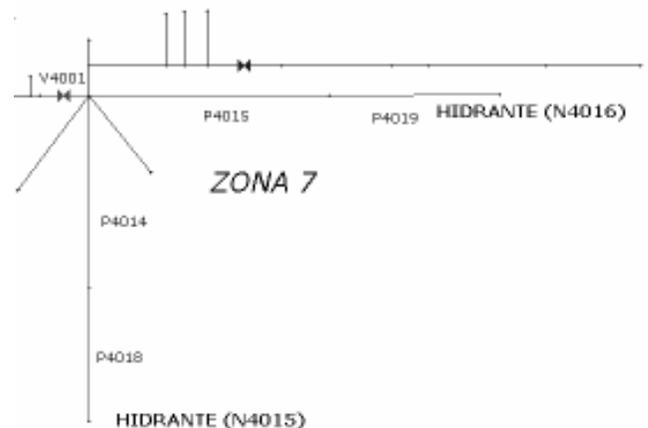


Figura 2. Lavado Hidráulico, zona 7, tramo 6.

Figure 2. Hydraulic Flushing, zone 7, line 6.

Para este caso en la zona 5 se presentan como consecuencia del LH en la zona 7 presiones por encima del límite máximo, variando desde 61 mca hasta 88 mca. El resto de las zonas de la red tienen presiones en el rango permitido de 15 a 60 mca.(Normas de Acueducto, Colombia).

Tabla 3. Condiciones de velocidad y presión para el LH, zona 7; tramo 6.

Table 3. Conditions of velocity and pressure to HF, zone 7, line 6.

TUBERÍA	L. (m)	Q (l/s)	V. (m/s)	OBSERVACIONES
P4014	318	33.42	1.89	LH Convencional Longitud del tramo 1085m. La válvula V4001 esta operando abierta.
P4016	318	31.46	1.78	
P4018	219	33.02	1.87	
P4019	230	31.06	1.76	
Válvula V4001	-	68.68	8.74	
Nodo N4015	Cota 1620m	33.02	Presión 8.54m	
Nodo N4016	Cota 1622m	31.06	Presión 7.55m	

Donde L es longitud de tubería, Q es caudal y V es velocidad de flujo.

- Lavado Hidráulico, zona 8, tramo 7: P4002-P4004- P4006- P4008- P5010- P5011- P5012-P5013 (Figura 3 y Tabla 4).

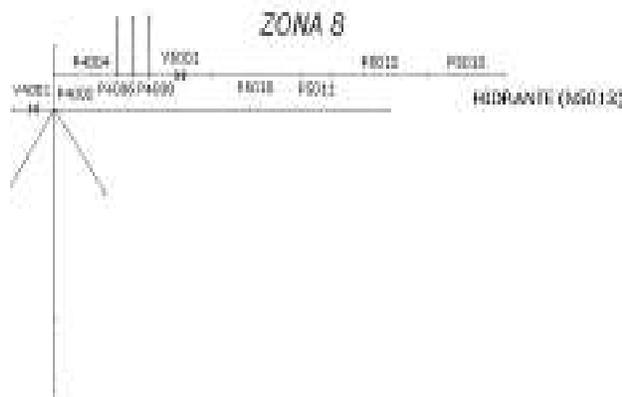


Figura 3. Sección Lavado Hidráulico, zona 8, tramo 7
Figure 3. Hydraulic flushing section, zone 8, line 7.

Tabla 4. Condiciones de velocidad y presión para el LH, zona 8; tramo 7.

Table 4. Conditions of velocity and pressure to HF, zone 8, line 7.

TUBERÍA	LONG. (m)	Q (l/s)	V (m/s)	OBSERVACIONES
P4002	56	23.54	3	LH Convencional Longitud del tramo 604m. Las válvulas V4001 y V5001 están operando abiertas.
P4004	91	23.28	2.96	
P4006	27	23.02	2.93	
P4008	33	22.76	2.9	
P5010	158	22.5	2.87	
P5011	52	22.34	2.84	
P5012	100	22.18	2.82	
P5013	87	22.02	4.98	
Válvula V4001		27.44	3.49	
Válvula V5001		22.5	45.84	
Nodo N5013	Cota 1563m	22.02	Presión 3.8m	

En este caso las presiones en la zona 5 no cumplen con el criterio de operación de la red. Es de anotar la alta velocidad de flujo en la válvula 5001, cumpliéndose las velocidades de lavado mayores que 1.8 m/s, ver tabla 4. Las condiciones de operación y de simulación del LH no son las mejores, por lo que realizó un LHU.

4.2 Mejoramiento de los Lavados Hidráulicos, zona 7 y 8 (LHU, Figura 4 y Tabla 5).

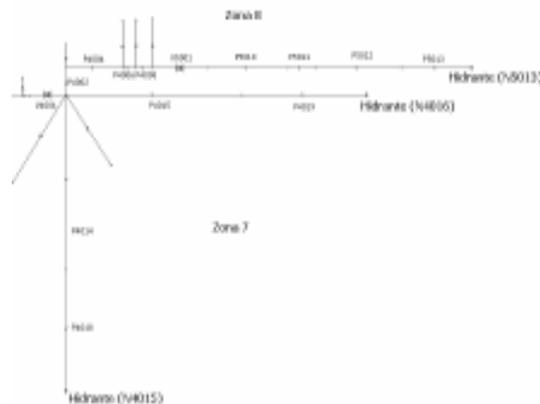


Figura 4. Sección Lavado Hidráulico, zonas 7 y 8.
Figure 4. Hydraulic flushing section, zones 7 and 8.

Tabla 5. Condiciones de velocidad y presión para el *LHU*, zona 7 y 8.

Table 5. Conditions of velocity and pressure to UHF, zone 7 and 8.

TUBERÍA	L. (m)	Q (l/s)	V. (m/s)	OBSERVACIONES
P4002	56	23,55	3	LH Unidireccional, Se aisló el tramo a lavar. Se insertaron 2 válvulas reductoras de presión. Se cerró la válvula V1 nueva.
P4004	91	23,29	2,97	
P4006	27	23,03	2,93	
P4008	33	22,77	2,9	
P4014	318	33,42	1,89	
P4015	318	31,46	1,78	
P4018	219	33,02	1,87	
P4019	230	31,06	1,76	
P5010	158	22,51	2,87	
P5011	52	22,35	2,85	
P5012	100	22,19	2,83	
P5013	87	22,03	4,99	
Nodo N4015	Cota1620	33,02	Presión 8,54	
Nodo N4016	Cota 1622	31,06	Presión 7,55	

Se instala una válvula en la zona para realizar los *LHU* en la zona 7 y 8 simultáneamente, abriendo 3 hidrantes. En este caso se cumple con las condiciones de velocidad mínima de flujo en las tuberías y se obtienen unas presiones de servicio dentro del rango de operación de la red.

Un parámetro importante es determinar el caudal y la velocidad de lavado. Para el caudal de lavado se puede emplear la ecuación 1:

$$Q = 26.8d^2 \sqrt{P} \quad (1)$$

Donde: Q= Caudal de *LH* en gpm, D= Diámetro de apertura del hidrante en pulgadas, P= Presión de la apertura del hidrante en psi.

5. CONCLUSIONES

Las conclusiones de este trabajo apuntan a consideraciones de operación que hay que tener cuando se planifica, simula y ejecuta un *LH*:

No existen dos situaciones de formación de biopelícula similares ya que el crecimiento y control de las mismas depende de interacciones biológicas, químicas e hidráulicas. Básicamente

el tipo de tratamiento del agua en las plantas de potabilización y el diseño de las redes propenderán por la formación de la biopelícula en mayor o menor grado.

Un Lavado Hidráulico es un caso particular en un sistema de distribución. El grado de planeamiento y el desarrollo del programa, depende de aspectos como los objetivos deseados en la calidad del agua, topología de la red, dinámica de crecimiento de la biopelícula, el mantenimiento hidráulico en consideración y las características hidráulicas.

Considerando las técnicas disponibles para el control de la biopelícula, el Lavado Hidráulico y en especial el Unidireccional ha mostrado gran ventaja desde el punto de económico y de implementación en campo. La eficacia del Lavado Hidráulico es inversamente proporcional a la longitud de la tubería, mientras más corto sea este las pérdidas de presión son menores, mejorando el resultado del lavado. El Lavado Hidráulico presenta además buenos resultados si se hace periódicamente. En el caso simulado el caudal del *LHU* por los tres hidrantes es de 86.11 l/s y si se considera una tarifa de 0.477 USD/m³, se tiene un costo de agua para la empresa que abastece el fluido de 148 USD m³/hora.

La duración del Lavado Hidráulico en el campo es variable y particular para cada caso, este termina cuando se alcanzan los parámetros de calidad de agua deseados.

El criterio de velocidad de diseño mínima de flujo de 0.6 m/s a partir del cual empieza la sedimentación podría ser revisado ya que la literatura presenta una velocidad límite de 0.76 m/s para la formación de biopelícula. Es importante tener en cuenta que la biopelícula siempre se formará y que la zona de la subcapa laminar es apropiada para ello por las velocidades despreciables y los esfuerzos cortantes máximos. Generalmente el *LH* se práctica en las conducciones de la red principal, pero su aplicación y mejoramiento debe llegar a la red secundaria.

La presencia y control de biopelícula implicarán en el futuro hacer diseños de redes considerando los diámetros, accesorios, radios de curvatura

apropiados para mejorar la eficiencia de la técnica del Lavado Hidráulico, y especialmente las mecánicas (pigs) La tarea de un buen servicio debe incluir la opción de prever su formación en las zonas críticas y adelantar los controles respectivos antes de que los usuarios presentes quejas. Un modelo que ayude a determinar tasas de formación de biopelícula en tuberías sería de gran interés y ayuda.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ANTOUN, E., DYSKSEN, J. y HILTEBRAND, D. Unidirectional flushing. Journal AWWA, July 1999.
- [2] CBE. The center For Biofilm Engineering. A friendly guide to biofilm basics & the CBE [en línea]. 1999-2003. Universidad del estado de Montana.
<http://www.erc.montana.edu/CBEssentials-SW/bf-basics-99/default.htm>
- [3] CHADDERTON, R. A., CHRISTENSEN, G. L. y HENRY-UNRATH, P. Implementation and Optimization of Distribution Flushing Programs [en línea]. Universidad de Villanova. 1992.
<http://www.awwarf.com/exsums/90600.htm>
- [4] CHARACKLIS, W.G. y MARSHALL, K.C. Biofilms. Ed. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York 1990.
- [5] COSTERNON, J.W y PHILIPS S.. Battling biofilms. Scientific American. Julio 2000. pp 61-67.
- [6] COSTERTON, J.W., LEWANDOWSKI, Z., CALDWELL, D.E., KORBER, D.R. y LAPPIN-SCOTT, H.M. Microbial Biofilms. Annual Reviews of Microbiology, número 49, 1995. pp. 711-745.
- [7] EDSTROM INDUSTRIES INC. An introduction to Biofilms [en línea].
http://www.edstrom.com/resources.cfm?doc_id=23
- [8] EMDE, K. M. E, OBEROI, K. y SMITH D. W. Evaluation of Various Methods for Distribution System Biofilm Control. Annual Conference Proceedings; American Water Works Association; Engineering and Operations Anaheim, CA. Junio 18-22, 1995. pp. 299-309.
- [9] FLEMMING, H.C. y GEESEY G.G. Biofouling and Biocorrosion in Industrial Water Systems, Springer-Verlag, Nueva York 1991.
- [10] FRIEDMAN, Melinda. Distribution system. Flushing program. Journal AWWA. Julio 2002, vol. 94, num. 7, pp. 48-56.
- [11] HARFST, W.F. Fundamentals in Microbiology for High-Purity Water Treatment. Julio- Agosto, 1992, pp. 33-35.
- [12] MELO, L.F. and T. R. BOTT. Biofouling in Water Systems. Experimental Thermal and Fluid Science, 1997; 14; 375-381.
- [13] MELTZER, T.H. High-purity Water Preparation for the Semiconductor, Pharmaceutical, and Power Industries. Tall Oaks Publishing, Inc., Littleton CO, 1993.
- [14] MITTELMAN, M.W. Biological Fouling of Purified-Water Systems: Part 1, Bacterial Growth and Replication, Microcontamination 3. Octubre 1985.p 51-55, 70.
- [15] PATTERSON, M.K.; HUSTED, G.R.; RUTKOWSKI, A. y MAYETTE, D.C. Isolation, Identification, and Microscopic Properties of Biofilms in High-Purity Water Distribution Systems. Mayo / junio, 1991, pp. 18-24.
- [16] PICOLOGLOU, B. F., ZELVER, N. y CHARACKLIS, W. G. Biofilm growth and hydraulic performance. Journal of the Hydraulics Division, Mayo, 1980, pp. 733-745.
- [17] PEDERSON, K. Biofilm Development on Stainless Steel and PVC Surfaces in Drinking Water, 1990, pp. 239-243.
- [18] PITTNER, G.A. y BERTLER, G. Point-of-use Contamination Control of High Purity Water Through Continuous Ozonation. Mayo-junio, 1988, pp. 16-22.

[19] PIZZI, Nick. Optimizing Distribution system operations. Cleveland Division of Water, Cleveland, OH. En: Opflow. Noviembre, vol. 22, num.11, 1996, pp. 4-6.

[20] SCHAULE, Gabriela y FLEMING, Hans-Curt. Pathogenic Microorganisms in Water System Biofilm Need Biofilm Sampling [en línea]. Institute for Water Chemistry and Water Technology. Abril 1997.
<http://www.intercorr.com/microrg.htm>

[21] SLY, L. I.; HODGKINSON, M. C.; ARUNPAIROJANA, V. Effect of water velocity on the early development of manganese-depositing biofilm in a drinking-water distribution system. FEMS Microbiology, Ecology, vol. 53, num 3-5, 1998, pp. 175-186.