

---

# **Determinación de reglas de operación (restricciones) de redes de distribución de agua potable con el fin de lograr una operación sin posibilidad de desprendimiento de Bio-películas**

---

## **AGRADECIMIENTOS**

*El desarrollo de este proyecto de grado fue posible gracias a la asesoría del Ingeniero Juan Saldarriaga quien me guió en la investigación, análisis realizados y en la redacción del documento. Adicionalmente quiero agradecer a las personas del CIACUA y en especial a Diego Páez quien me orientó en el proceso investigativo. Por otra parte quiero agradecer a mi familia, María Teresa Cortes, Álvaro Peñuela, Juan Pablo Peñuela y María Camila Peñuela, pues fueron ellos quienes me permitieron llegar a este momento de mi vida profesional y finalmente a Sebastián Sandino quien me ha acompañado en todo el proceso de desarrollo de este documento, siendo mi apoyo permanente.*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Importancia del Estudio de las Biopelículas.....	1
1.2. Programas para el Análisis .....	2
1.3. Objetivos .....	3
1.3.1. Objetivo General.....	3
1.3.2. Objetivos Específicos .....	3
<b>2. ANTECEDENTES</b> .....	<b>5</b>
<b>3. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>7</b>
3.1. Las Biopelículas .....	7
3.1.1. Composición de las Biopelículas.....	7
3.1.2. Estructura de las Biopelículas.....	9
3.2. Aspectos Hidráulicos Involucrados en el Desprendimiento de la Biopelícula .....	11
3.2.1. Interacción del Flujo con la Pared de la Tubería .....	11
3.2.2. Velocidad del Flujo en las Tuberías .....	12
3.2.3. Esfuerzo Cortante en la Pared de las Tuberías.....	13
3.2.4. Perdidas por Fricción .....	14
3.2.5. Cambio en la Dirección del Flujo al interior de las Tuberías .....	15
3.3. Programa de Lavado .....	16
3.3.1. Introducción al Programa de Lavado.....	16
3.3.2. Operación del Programa.....	17
3.3.2.1. Las Velocidades Mínimas y Máximas .....	17
3.3.2.2. Presión Mínima.....	18
3.3.2.3. Válvulas.....	18
3.3.2.4. Hidrantes .....	18
3.3.2.5. Nivel de Aproximación.....	19
3.3.2.6. Función Objetivo.....	19
3.3.2.7. Influencia .....	20
3.3.2.8. Reporte de Lavado.....	20
<b>4. METODOLOGÍA Y RESULTADOS</b> .....	<b>22</b>
4.1. Software Utilizado para la Modelación.....	22

4.2. La Red R-28.....	22
4.2.1. Caso 1.....	24
4.2.2. Caso 2.....	24
4.2.3. Caso 3.....	25
4.2.4. Caso 4.....	25
4.2.5. Caso 5.....	26
4.3. Metodología de Análisis.....	26
4.4. Resultados.....	30
4.4.1. Prueba 1.....	30
4.4.1.1. Caso 1.....	31
4.4.1.2. Caso 2.....	32
4.4.1.3. Caso 3.....	33
4.4.1.4. Caso 4.....	34
4.4.1.5. Caso 5.....	35
4.4.2. Prueba 2.....	37
4.4.2.1. Caso 1.....	37
4.4.2.2. Caso 2.....	38
4.4.2.3. Caso 3.....	39
4.4.2.4. Caso 4.....	41
4.4.2.5. Caso 5.....	42
4.4.3. Prueba 3.....	44
4.4.3.1. Caso 1.....	44
4.4.3.2. Caso 2.....	45
4.4.3.3. Caso 3.....	46
4.4.3.4. Caso 4.....	47
4.4.3.5. Caso 5.....	48
4.4.4. Prueba 4.....	49
4.4.4.1. Caso 1.....	49
4.4.4.2. Caso 2.....	50
4.4.4.3. Caso 3.....	52
4.4.4.4. Caso 4.....	53
4.4.4.5. Caso 5.....	54
4.4.5. Comparación de las Pruebas 1, 2, 3 y 4.....	56
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>58</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>61</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Tuberías con desprendimiento de biopelícula en el Caso 1 de la Prueba 1.	<b>31</b>
<b>Tabla 2.</b> Tuberías con desprendimiento de biopelícula en el Caso 2 de la Prueba 1.	<b>33</b>
<b>Tabla 3.</b> Tuberías con desprendimiento de biopelícula en el Caso 3 de la Prueba 1.	<b>34</b>
<b>Tabla 4.</b> Tuberías con desprendimiento de biopelícula en el Caso 4 de la Prueba 1.	<b>34</b>
<b>Tabla 5.</b> Tuberías con desprendimiento de biopelícula en el Caso 5 de la Prueba 1.	<b>35</b>
<b>Tabla 6.</b> Tuberías con desprendimiento de biopelícula en el Caso 1 de la Prueba 2.	<b>37</b>
<b>Tabla 7.</b> Tuberías con desprendimiento de biopelícula en el Caso 2 de la Prueba 2.	<b>38</b>
<b>Tabla 8.</b> Tuberías con desprendimiento de biopelícula en el Caso 3 de la Prueba 2.	<b>40</b>
<b>Tabla 9.</b> Tuberías con desprendimiento de biopelícula en el Caso 4 de la Prueba 2.	<b>41</b>
<b>Tabla 10.</b> Tuberías con desprendimiento de biopelícula en el Caso 5 de la Prueba 2.	<b>43</b>
<b>Tabla 11.</b> Tuberías con desprendimiento de biopelícula en el Caso 1 de la Prueba 3.	<b>44</b>
<b>Tabla 12.</b> Tuberías con desprendimiento de biopelícula en el Caso 2 de la Prueba 3.	<b>45</b>
<b>Tabla 13.</b> Tuberías con desprendimiento de biopelícula en el Caso 3 de la Prueba 3.	<b>46</b>
<b>Tabla 14.</b> Tuberías con desprendimiento de biopelícula en el Caso 4 de la Prueba 3.	<b>47</b>
<b>Tabla 15.</b> Tuberías con desprendimiento de biopelícula en el Caso 5 de la Prueba 3.	<b>48</b>
<b>Tabla 16.</b> Tuberías con desprendimiento de biopelícula en el Caso 1 de la Prueba 4.	<b>50</b>
<b>Tabla 17.</b> Tuberías con desprendimiento de biopelícula en el Caso 2 de la Prueba 4.	<b>51</b>
<b>Tabla 18.</b> Tuberías con desprendimiento de biopelícula en el Caso 3 de la Prueba 4.	<b>52</b>
<b>Tabla 19.</b> Tuberías con desprendimiento de biopelícula en el Caso 4 de la Prueba 4.	<b>53</b>
<b>Tabla 20.</b> Tuberías con desprendimiento de biopelícula en el Caso 5 de la Prueba 4.	<b>55</b>
<b>Tabla 21.</b> Matriz del número de tuberías afectadas por desprendimiento de biopelícula en los diferentes casos de las pruebas realizadas.	<b>56</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Tres etapas de formación de la biopelícula.	<b>10</b>
<b>Figura 2.</b> Diagrama del Comportamiento de la Capa Límite en una tubería.	<b>12</b>
<b>Figura 3.</b> Desprendimiento de la Biopelícula.	<b>15</b>
<b>Figura 4.</b> Opción para modificar los rangos de velocidad de las tuberías.	<b>17</b>
<b>Figura 5.</b> Opción para modificar los Hidrantes en la Red.	<b>19</b>
<b>Figura 6.</b> Reporte de Lavado.	<b>21</b>
<b>Figura 7.</b> Red R-28 original sin modificaciones.	<b>23</b>
<b>Figura 8.</b> Red R-28 sin las Tuberías 16 y 33.	<b>24</b>
<b>Figura 9.</b> Red R-28 sin la Tubería 23.	<b>24</b>
<b>Figura 10.</b> Red R-28 sin la Tubería 25.	<b>25</b>
<b>Figura 11.</b> Red R-28 sin la Tubería 2.	<b>25</b>
<b>Figura 12.</b> Red R-28 sin la Tubería 46.	<b>26</b>
<b>Figura 13.</b> Procedimiento utilizado para observar los casos de desprendimiento de Biopelícula en las diferentes pruebas.	<b>29</b>
<b>Figura 14.</b> Error Caso 1 de la Prueba 1 para 5 tuberías evaluadas.	<b>31</b>
<b>Figura 15.</b> Reporte de Lavado para el Caso 1 de la Prueba 1 para 4 tuberías evaluadas.	<b>32</b>
<b>Figura 16.</b> Error del Programa de Lavado por Presiones Negativas.	<b>33</b>
<b>Figura 17.</b> Reporte de Lavado para el Caso 4 de la Prueba 1.	<b>35</b>
<b>Figura 18.</b> Reporte de Lavado para el Caso 4 de la Prueba 1.	<b>36</b>
<b>Figura 19.</b> Reporte de Lavado para el Caso 1 de la Prueba 2.	<b>37</b>
<b>Figura 20.</b> Error del Programa de Lavado.	<b>38</b>
<b>Figura 21.</b> Reporte de Lavado para el Caso 2 de la Prueba 2.	<b>39</b>
<b>Figura 22.</b> Reporte de Lavado para el Caso 3 de la Prueba 2.	<b>41</b>
<b>Figura 23.</b> Reporte de Lavado para el Caso 4 de la Prueba 2.	<b>42</b>
<b>Figura 24.</b> Reporte de Lavado para el Caso 5 de la Prueba 2.	<b>43</b>
<b>Figura 25.</b> Reporte de Lavado para el Caso 1 de la Prueba 3.	<b>45</b>
<b>Figura 26.</b> Error del Programa de Lavado.	<b>46</b>
<b>Figura 27.</b> Reporte de Lavado para el Caso 3 de la Prueba 3.	<b>47</b>

---

<b>Figura 28.</b> Reporte de Lavado para el Caso 4 de la Prueba 3.	<b>48</b>
<b>Figura 29.</b> Reporte de Lavado para el Caso 5 de la Prueba 3.	<b>49</b>
<b>Figura 30.</b> Reporte de Lavado para el Caso 1 de la Prueba 4.	<b>50</b>
<b>Figura 31.</b> Reporte de Lavado para el Caso 2 de la Prueba 4.	<b>52</b>
<b>Figura 32.</b> Reporte de Lavado para el Caso 3 de la Prueba 4.	<b>53</b>
<b>Figura 33.</b> Reporte de Lavado para el Caso 4 de la Prueba 4.	<b>54</b>
<b>Figura 34.</b> Reporte de Lavado para el Caso 5 de la Prueba 4.	<b>55</b>
<b>Figura 35.</b> Curva de tuberías Afectadas para cada caso en las diferentes Pruebas.	<b>57</b>

## 1. INTRODUCCIÓN.

### 1.1 Importancia del Estudio de las Biopelículas

La población mundial ha determinado estándares de condiciones químicas y microbiológicas para determinar los casos en los cuales el agua puede ser considerada potable o contaminada. Para cada parámetro medido en el agua se han determinado diferentes rangos los cuales indican la calidad del agua de consumo. Estos parámetros son medidos en las salidas de las plantas de tratamiento de agua potable que surten las redes de distribución que alimentan las poblaciones.

Anteriormente se consideraba que cumplir con los parámetros de calidad a las salidas de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP), así como la adición de un desinfectante, era suficiente para entregar agua de buena calidad a los usuarios de las redes de distribución; sin embargo estudios relativamente recientes demostraron que variables hidráulicas y componentes del agua son la causa de la creación de colonias de bacterias al interior de las tuberías que comprenden las redes. Esto demuestra que una gran cantidad de microorganismos son capaces de soportar condiciones inhóspitas en las cuales se manejan ambientes de temperaturas extremas, oxígeno reducido y nutrientes reducidos.

Gracias a estudios realizados en las redes de distribución de agua potable (RDAP), se ha demostrado que los microorganismos que se presentan en estas son capaces de asociarse de tal forma que encuentran beneficio propio en el desarrollo de su colonia; esto es visible en las Biopelículas ya que al interior de ellas se encuentran condiciones aptas para el desarrollo bacteriano, ya que se crean ecosistemas adecuados para que estos organismos se desarrollen y adicionalmente se reproduzcan.

Dentro de las Biopelículas normalmente no se encuentran organismos tóxicos o causantes de enfermedades dentro de las colonias, sin embargo se ha demostrado que la presencia de biopelícula en las tuberías permite que en el caso de que en la red se introduzca un organismo patógeno, este encuentre condiciones aptas para su supervivencia. Adicionalmente en los casos

que se ha registrado desprendimiento de biopelícula se han presentado rechazos del recurso debido a la presencia de olores y sabores desagradables en el agua.

Los organismos patógenos que posiblemente se presenten al interior de las redes de distribución pueden ingresar de diferentes maneras; entre ellas se encuentran las partículas de turbiedad que sobrepasan los filtros de las PTAP, partículas de carbón activado provenientes de los filtros, uniones o tuberías rotas, presencia de presiones negativas en la red, las cuales causan ingreso de aguas contaminadas, entre otras razones (Gelves& Saldarriaga. 2005).

Las Biopelículas son grupos de microorganismos ordenados que se asocian entre ellos y la pared de la tubería con una sustancia que ellos mismos segregan. Estas biopelículas que se forman en la pared interior están compuesta por una serie de bacterias que aunque no suelen ser patógenas, existe un porcentaje de ellas que si pueda serlo (Gamarra& Saldarriaga. 2004). Por esta razón es objetivo de este proyecto determinar los casos en los cuales un cambio en la operación hidráulica de las redes de distribución puede ser el causante de que estos organismos lleguen al consumidor final.

Se ha demostrado en experimentos de laboratorio que existen condiciones bajo las cuales la biopelícula se desarrolla en mayor cantidad y por lo tanto en mayores espesores de la capa; estas condiciones están determinadas por la velocidad al interior de la tubería y por lo tanto por el esfuerzo cortante que allí se desarrolla. Las condiciones mencionadas anteriormente permiten determinar reglas de operación bajo las cuales las biopelículas deben ser operadas para evitar que en estas se presente un episodio de desprendimiento de biopelícula en los casos en los que se desarrolla un cambio de operación en las RDAP debido a posibles mantenimientos o daños en las redes.

## **1.2 Programas para el análisis**

Para el desarrollo de este proyecto fue necesario el uso de herramientas de programación en redes de distribución de agua potable que permitieran observar las condiciones hidráulicas que se presentaban al interior de las tuberías, para de esta forma determinar cuáles eran las variables

que se presentaban al generar algún cambio en la operación de las redes de distribución. La herramienta REDES fue empleada en el desarrollo de la información de esta tesis para lograr observar los diferentes casos de análisis; este programa fue desarrollado en el Centro de Investigaciones en Acueducto y Alcantarillados (CIACUA) del departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes.

En el programa REDES a inicios del año 2011, fue desarrollada una herramienta que permite operar las redes bajo diferentes restricciones en cuanto a la velocidad promedio que se genera al interior de cada una de las tuberías; esta herramienta se llamó "LAVADO" y de igual forma fue desarrollada en el CIACUA.

### **1.3 Objetivos.**

#### **1.3.1. Objetivo General.**

El objetivo de esta tesis es analizar y determinar la forma de operación de las redes de distribución, para evitar que el receptor del sistema tenga contacto con las biopelículas presentes a lo largo del sistema de acueducto.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos.**

Los objetivos específicos pretenden exponer los principales resultados que se pretenden obtener al realizar este proyecto. Adicionalmente presentan los contenidos principales que se observarán a lo largo del documento.

- Realizar un estado del arte sobre las condiciones que se presentan para el desprendimiento de biopelículas
- Realizar un análisis sobre el programa de Lavado en el que se permita entender su forma de operación, aplicaciones e implementación.
- Determinar las reglas de operación bajo las cuales se debe operar una red para evitar desprendimiento de la biopelícula.

- 
- Comparar los resultados obtenidos frente a las condiciones hidráulicas en los diferentes escenarios de operación de la Red.
  - Evaluar los resultados obtenidos en el programa de Lavado, indicando los casos en el cual el programa es útil para evitar el desprendimiento de biopelícula en las RDAP.
  - Contribuir a las formas de operación en las redes de distribución, para evitar el contacto del usuario final con las biopelículas formadas en los casos de mantenimiento o daño de alguna o varias tuberías de la red.
  - Redactar un documento de Tesis en el cual se vean reflejados todos los objetivos anteriormente expuestos de una forma clara.

## 2. ANTECEDENTES

El estudio de las biopelículas en las redes de distribución ha adquirido una gran relevancia con el tiempo; esto se debe a que las biopelículas pueden considerarse como un “vector” entre los organismos patógenos y los usuarios de una RDAP. Esta preocupación está expuesta ya que se sabe que la biopelícula se presenta en cualquier caso que el agua este en contacto con una superficie y que es un conjunto de microorganismos que se agrupan en una superficie gracias a una sustancia que ellos mismos segregan.

Teniendo en cuenta la definición de biopelícula, se debe tener en cuenta a su vez, que de la misma forma que esta se agrupa y compacta en contacto con una tubería, también existen aspectos de la operación hidráulica que causan su desprendimiento o en el caso contrario un mayor crecimiento de esta. Por las razones expuestas anteriormente se tendrán en cuenta estudios investigativos realizados anteriormente, los cuales permitirán avanzar en el tema de este proyecto y entender de mejor manera lo que sucede al interior de las tuberías. Estos estudios previos son:

- Rothstein, E.G. &Takahshi, S. (2011). Planeación de lavado unidireccional en redes de distribución de agua: Una aproximación. Bogotá: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Computación.

El Ingeniero Rothstein desarrolla mediante este proyecto un programa para ejecutar lavados en las redes de distribución de agua potable bajo diferentes requerimientos definidos por los usuarios del mismo. Este programa se encuentra introducido en el software REDES que ha sido elaborado en el CIACUA anteriormente. El programa de Lavado permite evaluar las tuberías afectadas en los casos en los cuales se altera la RDAP, de esta manera el programa se pretende utilizar para el proyecto de estudio realizando observaciones de los casos en los cuales se genera un desprendimiento de la biopelícula debido al cierre de una o mas tuberías.

- Muñoz, L.F, Saldarriaga, J.G. (2005). Velocidad de desprendimiento de las biopelículas en tuberías de distribución de agua potable. Bogotá: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

Este documento presenta un análisis teórico de los conceptos relacionados con el crecimiento, desarrollo y métodos control de las biopelículas. De igual forma el proyecto desarrolla un montaje, el cual permite comparar la parte teórica desarrollada con la parte práctica ejecutada en el laboratorio. Este estudio permitió obtener información de interés para el análisis del estado del arte sobre las biopelículas (formación, consecuencias en la salud y posibles causas de desprendimiento de la misma).

- Informe de Producto 5. Estudio, investigación sobre los factores que generan la formación, crecimiento y posterior desprendimiento de biopelículas en las redes matrices de acueducto debido a la composición fisicoquímica y microbiológica del agua potable y selección de una metodología de recolección de muestras de biopelículas de acuerdo al estado del arte nacional e internacional. Fase I. (2009). Bogotá: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados- CIACUA.

Este informe realizado en la universidad de los Andes durante el 2009 realiza un análisis profundo de las causas por las cuales se genera la formación, crecimiento y desprendimiento de la biopelícula en las redes matrices. De esta manera este estudio permitió entender de manera precisa las causas por las cuales se generaba el desprendimiento de la biopelícula bajo diferentes eventos en la red matriz de Bogotá, ya que se evaluaban diferentes casos en los cuales se manifestaba presencia de biopelícula por parte de los usuarios en diferentes escenarios en los cuales se generaron cierres de una o más tuberías.

### 3. MARCO TEÓRICO.

#### 3.1. Las Biopelículas

Las biopelículas se definen como una capa de microorganismos en un ambiente acuático, los cuales se encuentran unidos en una matriz polimérica con apariencia de limo, la cual generalmente se encuentra fija a un sustrato como puede ser las paredes internas de las tuberías o depósitos de sedimentos (Gelves, M.F. & Saldarriaga, J.G. 2005). En la actualidad existen muchas definiciones para las biopelículas; sin embargo todas coinciden en una misma cosa y es que son un conjunto de microorganismos unidos a una superficie en contacto con el agua por una sustancia que ellos mismos segregan.

##### 3.1.1. Composición de las Biopelículas

Según las definiciones obtenidas para biopelícula se puede suponer que estas son estructuras complejas en las cuales se puede encontrar una gran variedad de microorganismos de diferentes especies que interactúan entre sí para lograr formar comunidades resistentes a los diferentes factores ambientales (temperaturas variables, velocidades variables, fuerzas cortantes, entre otros) que se les presentan en el medio y adicionalmente les permite crear interacciones e intercambio genético.

El informe realizado en el CIACUA sobre "investigación sobre los factores que generan la formación, crecimiento y posterior desprendimiento de biopelículas" incluye un estudio exhaustivo sobre artículos presentados en diferentes revistas científicas (aproximadamente 100 publicaciones); en este estudio mencionado se logró encontrar que aproximadamente 335 microorganismos encontrados en las redes de distribución son de alto riesgo para la salud pública, de estos 119 son bacterias patógenas, 131 son bacterias ambientales, 13 son hongos y levaduras, 15 son virus, 12 son protozoos y 4 son cianobacterias, el resto de los microorganismos encontrados son desconocidos.

A continuación se realizará una descripción general de algunos de los organismos patógenos que es posible encontrar al interior de las biopelículas (Hernández, M.X & Saldarriaga, J.G. 2010):

## Bacterias

Como se mencionó anteriormente dentro de los microorganismos encontrados dentro de las biopelículas o en las redes de distribución de agua potable es posible hallar una gran cantidad de bacterias nocivas para la salud humana; dentro de esta sección se mencionaran algunas de estas cuales corresponden las principales bacterias que corresponden a patógenos intestinales, algunos otros patógenos de bacterias oportunistas. A continuación se mencionan brevemente cada uno de los organismos:

*Escherichia Coli*: Es una bacteria anaerobia que comunmente se encuentra en el tracto gastrointestinal de los seres humanos, por esta razón es la bacteria que comunmente se encuentra en las heces de humanos y algunos animales y por lo tanto es un indicador de materia fecal en el agua.

*Campylobacter Jejuni*: Estos organismos toleran bajas concentraciones de oxígeno y altas temperaturas, por estas razones toleran muy bien las condiciones a las que son sometidas al interior de las biopelículas. Son los principales causantes de gastroenteritis en seres humanos.

*Helicobacter Pylori*: Esta especie es la causante de enfermedades tales como la gastritis y la úlcera péptica en los seres humanos; según esto el habitat natural de estos organismos es el estómago humano, por lo que se considera que su vía de adquisición es oral y se inicia en un ciclo oral-fecal.

*Pseudomonas Aeruginosa*: Esta bacteria en contacto con los seres humanos puede generar daños en el tracto pulmonar, el tracto urinario, en los tejidos o infecciones sanguíneas. Se encuentra clasificada como oportunista ya que en los casos en los que se adhiere a la biopelícula disminuye la cantidad de E.Coli y esta se reproduce con mayor rapidez.

*Legionella Pneumophila*: Esta bacteria se encuentra relacionada con el agua en su estado natural. Es la causante de la legionelosis que causa la neumonía.

*Vibrio Cholerae*: Organismos anaerobios y son los causantes de la cólera.

### Hongos

La relación existente entre la presencia de hongos y levaduras con problemas en la salud pública aun no se ha demostrado; es por esto que no se le ha prestado mayor atención a estudios relacionados con estos organismos. Algunos estudios han demostrado que eventos relacionados con olores y sabores desagradables se encuentran relacionados con estos microorganismos presentes en el agua. Estudios adicionales mostraron como algunos de los hongos encontrados eran peligrosos para la salud humana.

### Virus y Protozoos

Los virus son organismos que requieren de un hospedero (humanos o bacterias) para su supervivencia, por lo tanto estos se acumulan en la biopelícula pero no se reproducen. Algunos de los virus que es posible encontrar dentro de las biopelículas son los poliovirus (responsables de la poliomielitis), coxsackievirus (causantes de enfermedades respiratorias superiores), echovirus (causantes de enfermedades respiratorias superiores), rotavirus (causantes de gastroenteritis), Hepatitis A, Hepatitis E, astrovirus (causantes de gastroenteritis), entre otros.

Los protozoos son organismos altamente resistentes a desinfectantes como el cloro; adicionalmente se ha demostrado que se adhieren fácilmente a las biopelículas y de esta misma forma se desprenden fácilmente. Dentro de los protozoos encontrados dentro de las redes de distribución se encuentran la Giardia lamblia (causante de gastroenteritis), Cryptosporidium parvum (gastroenteritis), acanyhamoeba (causante de infecciones en los ojos), entre otros.

#### **3.1.2. Estructura de las Biopelículas**

En el momento en el cual se inicia la colonización de las tuberías por parte de los microorganismos, estos deben lograr por medio de fibras llamadas glicocalix adherirse a la superficie; estas fibras se extienden a través de la membrana celular y son capaces de adherirse a la superficie o a otros microorganismos que se encuentren junto a ellas, logrando de esta forma que factores tales como el movimiento del fluido o la fuerza cortante no las desprenda de la superficie de la cual estan adheridas (Gelves & Saldarriaga 2005). La formación de biopelículas se encuentra dividida en tres etapas principales las cuales se enumeran a continuación (Figura 1):

Primera Etapa: La primera etapa corresponde al acondicionamiento de la superficie, en esta etapa compuestos orgánicos presentes en el agua entran en contacto con la superficie de la tubería y la neutralizan permitiendo a los primeros microorganismos adherirse a esta; adicionalmente esta capa es utilizada como alimento para los primeros organismos.

Segunda Etapa: La segunda etapa corresponde a la colonización de la superficie; en esta etapa los primeros organismos que se han adherido a la pared han formado una estructura que permite a las bacterias que se presentan libres en el agua adherirse de una manera más sencilla, brindándoles el ambiente óptimo para resistir las condiciones del ambiente en la pared de la superficie. Es importante mencionar que estos microorganismos pueden resistir en estas zonas de las tuberías debido a la subcapa laminar presente que se explicará más adelante.

Tercera Etapa: La tercera y última etapa que se presenta en la composición de la tubería corresponde a la etapa de crecimiento. En esta etapa ya se presenta un ambiente idóneo para que los microorganismos puedan iniciar su reproducción de tal forma que subsistan entre ellos y resistan las condiciones del medio.

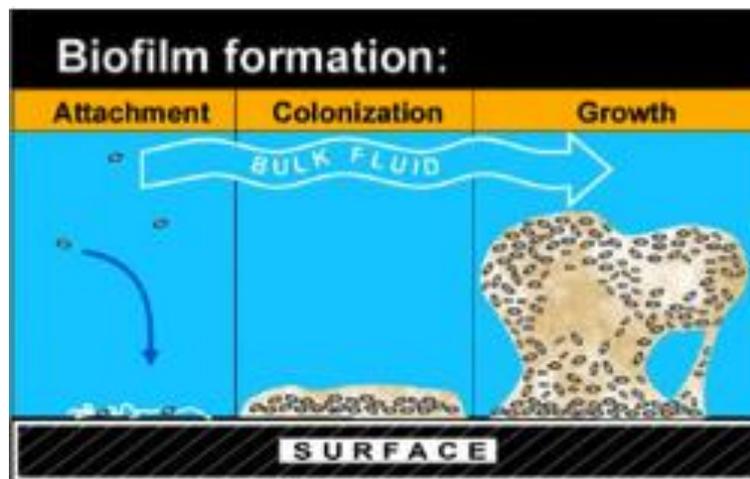


Figura 1. Tres etapas de formación de la biopelícula (Hernández & Saldarriaga, 2010).

### **3.2. Aspectos Hidráulicos involucrados en el Desprendimiento de la Biopelículas.**

Como se mencionó anteriormente existen condiciones hidráulicas que determinan la capacidad de creación de biopelícula; estas condiciones hidráulicas se encuentran determinadas por la velocidad al interior de la tubería, el esfuerzo cortante y finalmente el tiempo de residencia en la red. Sin embargo se ha determinado que bajo cualquier condición de operación en la red existirá biopelícula, el cambio que se observa es que a mayor velocidad existe un menor espesor de la capa presente.

Al determinar que bajo cualquier condición de operación se generará biopelícula, es posible crear una condiciones determinadas que permitan a los operadores saber en qué caso es posible que se dé un episodio de desprendimiento de la biopelícula. Por esta razón es necesario tener en cuenta las mismas variables hidráulicas que se tienen en cuenta para la generación de biopelícula y adicionalmente tener en cuenta los casos en los cuales se presenta cambio en la dirección del flujo al interior de algunas tuberías de la red. En esta sección se expondrán todas las condiciones hidráulicas que se deben tener en cuenta para determinar unas reglas de operación para evitar el desprendimiento de la biopelícula.

#### **3.2.1. Interacciones del Flujo con la Pared de la Tubería**

Con el fin de entender un poco más la interacción que existe entre las biopelículas y las condiciones hidráulicas de operación, se realizará una explicación breve de la interacción del flujo con la pared de la tubería. Ludwig Prandtl, científico alemán estableció que “Siempre que un fluido en movimiento interactúa con una pared sólida, el esfuerzo cortante que se genera afecta principalmente una zona de dicho flujo”; a esta zona se le llamó la Capa Límite, la cual puede ser laminar o turbulenta (Saldarriaga, 2007).

*Subcapa Laminar Viscosa:* La subcapa laminar viscosa se presenta cuando el flujo es turbulento debido a que la superficie sólida impide que cerca de ella ocurran vibraciones de forma libre; esta se denomina viscosa debido a que en esta capa priman las fuerzas viscosas sobre las inerciales.

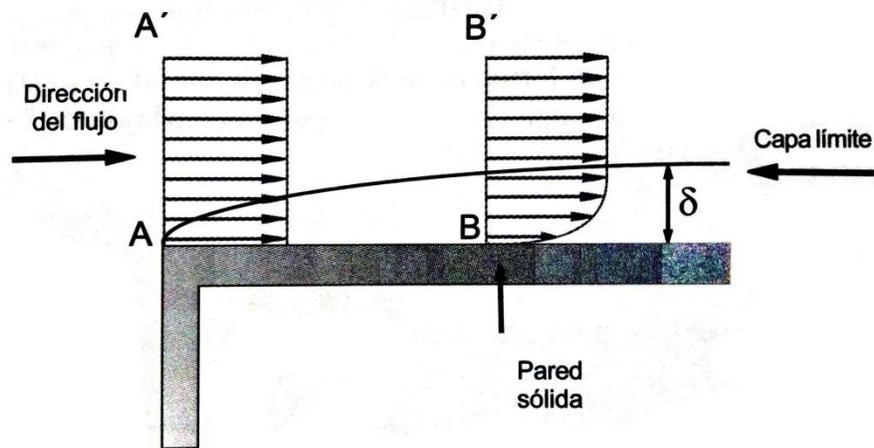


Figura 2. Diagrama del Comportamiento de la Capa Límite en una tubería (Saldarriaga, 2007).

La subcapa laminar viscosa se encuentra determinada por parámetros tales como la viscosidad cinemática y la velocidad de flujo en la tubería:

$$\delta = \frac{11.6 \cdot v}{v^*} \quad [1]$$

donde  $\delta$  es el espesor de la subcapa laminar viscosa (L),  $v$  es la viscosidad cinemática del agua a cierta temperatura ( $L^2T^{-1}$ ) y  $v^*$  es la velocidad del flujo ( $LT^{-1}$ ).

### 3.2.2. Velocidad de Flujo en las Tuberías

La velocidad promedio del fluido al interior de las tuberías se encuentra determinada por la cantidad de agua que atraviesa la tubería (Caudal) y el área transversal de dicha tubería. La ecuación que determina esta variable es:

$$V = \frac{Q}{A} \quad [2]$$

donde  $V$  es la velocidad de Flujo en la tubería ( $LT^{-1}$ ),  $Q$  es el caudal promedio en el interior ( $L^3T^{-1}$ ) y  $A$  es el área transversal de la tubería ( $L^2$ ).

La velocidad de flujo es determinante para el crecimiento de biopelícula; sin embargo estudios han demostrado que altas velocidades no previenen la formación de biopelículas, pero si determinan su espesor, esto se debe a que la teoría de la capa límite establece que el agua fluye lentamente en las cercanías de la pared de las tuberías hasta llegar a cero en la pared; esta zona se denomina la subcapa laminar y se considera que el espesor de la biopelícula se encontrará determinado por el espesor de esta capa (Muñoz & Saldarriaga (2005).

Estudios han demostrado que en los momentos en los que se presenta cambio de operación en las RDAP existen factores que causan el desprendimiento de la biopelícula; dentro de estos factores se encuentra los relacionados con la velocidad del flujo y estos a su vez, se encuentran determinados por (Antoun et al. 1999 & Informe de Producto 5. 2009):

- El aumento en más del 50% de la velocidad en las tuberías.
- Aumento en la velocidad por encima de 1,5 m/s o más.

### 3.2.3. Esfuerzo Cortante en la pared de las tuberías

En las tuberías existe un esfuerzo que se genera a raíz de la interacción del flujo en movimiento con la pared sólida de la tubería; para conocer esta fuerza es necesario conocer la caída de la altura piezométrica ( $h_f$ ) ya que existe una relación directa entre ellas; adicional a esto es necesario tener conocimiento de la relación entre el área mojada y el perímetro ( $rH$ ) y la longitud de la tubería. Por lo tanto al conocer los parámetros anteriores, es posible seguir adelante con el esfuerzo cortante que se define como:

$$\tau_w = rH \times \frac{\rho \cdot g \cdot h_f}{2L} \quad [3]$$

donde  $\rho$  corresponde a la densidad del agua a cierta temperatura ( $ML^3$ ) y  $g$  es la gravedad de la tierra ( $LS^{-2}$ ).

### 3.2.4. Pérdidas por Fricción

Para calcular las pérdidas por fricción que se registran en el sistema se utiliza la ecuación obtenida por Darcy – Weisbach, en la cual se tienen en cuenta parámetros como la longitud de la tubería, la velocidad, el diámetro, el tipo de fluido y el tipo de material de la tubería. Por esta razón la ecuación solo tienen en cuenta las pérdidas en la pared de la tubería y aquellas dadas por la viscosidad del fluido la ecuación utilizada y resultante de los estudios de Henry Darcy y Julius Weisbach es:

$$hf = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad [4]$$

donde L es la longitud de la tubería (L), V es la velocidad del fluido dentro de la tubería ( $LT^{-1}$ ), D es el diámetro de la tubería (L), g es la gravedad de la tierra que para este caso se tomó como  $9,8 \text{ m/s}^2$ . Por otro lado esta f que corresponde al factor de fricción y es calculado por EPANET con la misma ecuación derivada de los análisis de Darcy – Weisbach, está definido como:

$$f = \alpha + \frac{\beta}{\sqrt{V}} \cdot 6 \quad [5]$$

donde  $\beta$  y  $\alpha$  son coeficientes de fricción que varían según el diámetro y el material de la tubería (Saldarriaga, 2007).

Lo anterior pone en evidencia que al variar los caudales en las redes se produce una mayor velocidad al interior de algunas tuberías y por lo tanto esto causara un mayor esfuerzo en la biopelícula. Este esfuerzo ha sido según estudios anteriores una de las mayores causas de desprendimiento de la biopelícula en las RDAP, ya que una gran variación en el esfuerzo cortante durante un intervalo corto de tiempo puede causar una gran desestabilización de la biopelícula (Informe de Producto 5. 2009).

### 3.2.5. Cambio en la Dirección del Flujo al Interior de las Tuberías

Las biopelículas se forman durante diferentes etapas (Figura 1). En estas existe una etapa de constitución de la primera capa de la biopelícula, la cual consiste en los primeros microorganismos que se adhieren a la pared de la tubería y empiezan a segregar la sustancia que se encarga de mantenerlas rígidas dentro de la subcapa laminar. La segunda etapa corresponde a la colonización de nuevos microorganismos en la capa que ya se ha iniciado. Como tercer y último paso se presenta la etapa de crecimiento en el cual las bacterias ya adheridas empiezan su crecimiento y reproducción, aumentando el área superficial colonizada.

Teniendo en cuenta las tres etapas descritas anteriormente se puede determinar que en la tercera etapa las biopelículas ya cuentan con una estructura sólida que les permite permanecer adheridas a las paredes de la tubería evitando desprendimiento bajo condiciones normales de operación. Sin embargo se ha demostrado bajo estudios experimentales que las biopelículas desarrollan su estructura para resistir en contacto con la pared bajo una dirección del flujo ya que permiten el paso del caudal sin presentar inconvenientes en su estructura; de esta forma al crear un cambio en la dirección del flujo se genera desprendimiento de la biopelícula (Figura 3) ya que su estructura no se encuentra configurada para soportar esfuerzos en otra dirección.

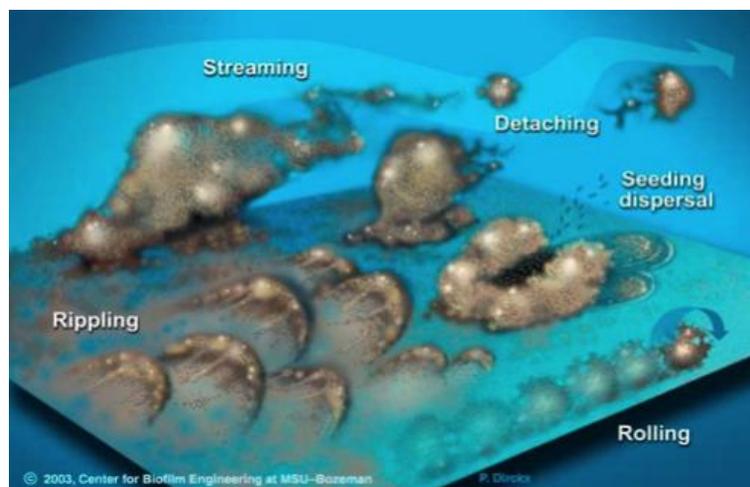


Figura 3. Desprendimiento de la Biopelícula (Gelves, M.F & Saldarriaga, J.G. 2005).

### 3.3. Programa de Lavado

#### 3.3.1. Introducción al Programa de Lavado

El programa de lavado fue desarrollado por el ingeniero de sistemas y computación Eric Gerard Rothstein Morris, durante el 2011, como su tesis de maestría. El Ingeniero Rothstein realizó el algoritmo para el lavado debido que pretendía determinar la existencia de un plan de lavado para una RDAP y de esta manera indicar como se implementaría esta herramienta en el campo.

El mecanismo de lavado que se tuvo en cuenta para la elaboración del programa, consistió en aumentar las velocidades al interior de las tuberías mediante dos mecanismos: Abrir un hidrante para generar una diferencia de presión, aumentando la velocidad en los tubos vecinos a operar de tal forma que se abran hidrantes y se operen válvulas para lograr las velocidades que se requieren para obtener un lavado eficiente en las tuberías a lavar.

En el lavado de tuberías tienen diferentes conceptos para la manera en que se opera el lavado en las tuberías, para los casos mencionados anteriormente se tienen en cuenta:

*Flushing:* Es el mecanismo de lavado que únicamente utiliza hidrantes para generar aumento de velocidades en las tuberías cercanas al hidrante. Este mecanismo de lavado es sencillo, pero en algunos casos el abrir un hidrante de ciertas condiciones no consigue alcanzar las velocidades requeridas para realizar el lavado.

*Unidirectional Flushing:* Este mecanismo de lavado consiste en operar válvulas e hidrantes simultáneamente para conseguir realizar el lavado manteniendo rangos de velocidades en algunas tuberías.

De esta manera para lograr operar una RDAP de tal forma que se realice el lavado en las tuberías que se desea, se debería conocer que hidrantes abrir y que válvulas operar; sin embargo determinar que válvulas operar no es una tarea sencilla ya que abrir o cerrar una válvula no garantiza que las tuberías cercanas cambien su velocidad, en muchos casos las tuberías que cambian la velocidad son lejanas a la válvula. El programa de Lavado consigue determinar en

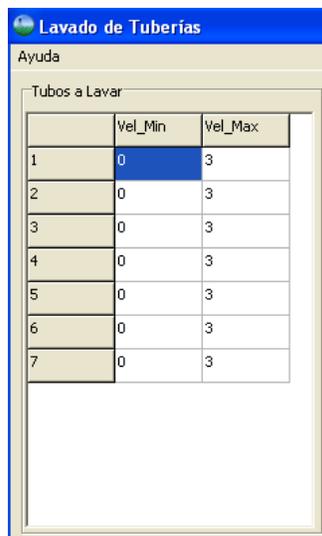
qué forma operar la red sin realizar innumerables veces prueba y error para saber cómo realizar el lavado en una red operando válvulas.

### 3.3.2. Operación del Programa

El programa de Lavado opera al interior del programa REDES; esta herramienta permite operar un lavado dada una RDAP, la cual debe contar con un conjunto de tuberías, nodos, hidrantes, válvulas y deberá encontrarse configurada para operar bajo condiciones normales. Adicionalmente el programa tiene un conjunto de restricciones que podrán causar que el programa no funcione en caso de que estas no cumplan. Las restricciones son:

#### 3.3.2.1. Las Velocidades Mínimas y Máximas

Cuando se pretende realizar el lavado el programa permitirá modificar el rango de velocidades en cada una de las tuberías en las que se pretende realizar el lavado (Figura 4). Se deberán establecer la velocidad mínima y máxima que se pretende manejar dentro de una tubería; sin embargo si se consideran rangos de velocidades que el programa no puede operar mediante las válvulas, demandas, hidrantes y demás consideraciones, el programa arrojará un error el cual indica que bajo ningún escenario es posible que se cumpla ese rango de velocidades considerado.



	Vel_Min	Vel_Max
1	0	3
2	0	3
3	0	3
4	0	3
5	0	3
6	0	3
7	0	3

Figura 4. Opción para modificar los rangos de velocidad de las tuberías (Programa Lavado).

### **3.3.2.2. Presión Mínima**

La red deberá cumplir con una presión mínima para asegurar que en todos los nodos se esté cumpliendo con la demanda exigida; en el caso de que la red no esté cumpliendo con las presiones mínimas el programa de Lavado tampoco operará. La presión mínima que se introduce en el programa es de cero para garantizar que esto se cumpla en caso de que la red no presente presiones negativas antes de realizar el lavado.

### **3.3.2.3. Válvulas**

La red que se introduzca para realizar el lavado deberá contar con un mínimo de tuberías para que sea factible realizar el lavado; esto se debe a que en el caso de que no existan válvulas las limitaciones para lograr que el programa funcione se reducen a una probabilidad muy pequeña.

La apertura de las válvulas se define para permitir que en campo el personal pueda saber que tanto abrir o cerrar las válvulas, de tal forma que el dato sea preciso. Los intervalos de apertura de las válvulas son restringidos a fracciones sencillas de reproducir en campo; de esta forma las posibilidades de apertura de las válvulas corresponden a cero (0) totalmente cerrada o uno (1) totalmente abierta.

### **3.3.2.4. Hidrantes**

La operación de hidrantes ayuda a que la probabilidad de que el programa funcione garantizando el lavado en las tuberías sea mayor, sin embargo la ausencia de hidrantes no significa que el programa no se pueda operar. Los hidrantes son modelados como nodos con exponente y coeficiente de emisión; en caso de que el coeficiente del emisor se encuentre en cero quiere decir que no existe hidrante en esa sección.

Hidrantes		
	Coef_Emisor	Exp_Emisor
2	0	0.5
3	0	0.5
4	0	0.5
5	0	0.5
6	0	0.5

Figura 5. Opción para modificar los Hidrantes en la Red (Programa Lavado).

### 3.3.2.5. Nivel de Aproximación

La aproximación define el valor del parámetro de aproximación, el cual indica la calidad de la solución que se encontrará como resultado. Al aumentar la aproximación se aumenta el número de escenarios que serán evaluados para encontrar una solución, por esta razón el tiempo que se tardará el programa en conseguir una respuesta aumentará, sobre todo en los casos de redes complejas y robustas. Es importante mencionar que el programa no funciona bajo una aproximación del 100%, pues se genera un error en el espacio de memoria de REDES.

### 3.3.2.6. Función Objetivo

La función objetivo con la cual cuenta el programa actualmente consiste en que el algoritmo de aproximación trabaja con la suma de velocidades en los tubos a lavar; sin embargo si se quisiera encontrar una solución exacta con un 100% de aproximación, el programa no se consideraría eficiente ya que tomaría una cantidad exponencial de tiempo en encontrar una solución, que adicionalmente se incrementaría en caso de utilizar el programa en una RDAP robusta.

En el programa se ha desarrollado un algoritmo de aproximación que debe encontrar en un tiempo polinomial una configuración que encuentre resultados similares a los de la solución exacta (Rubio, D.P. 2011); para estos se ha diseñado un valor de influencia el cual se explicará más adelante. La solución óptima entonces corresponderá a aquella que se aproxime más a la exacta (Donde la exacta corresponde a la solución si todas las tuberías a lavar logran la velocidad más alta del rango introducido por el usuario), contemplando un error que corresponde a la aproximación introducida por el usuario.

### 3.3.2.7. Influencia

La influencia es el indicador de la afectación que una configuración de una RDAP tiene sobre el programa. Para calcular el valor de la influencia es necesario calcular el valor de la influencia como uno más las velocidades de los tubos a lavar; en caso de que la velocidad de alguna de las tuberías supere la velocidad máxima el valor de la influencia sería  $-\infty$  (Rubio, D.P. 2011).

$$I = 1 + \sum V_1 V_2 \dots \dots V_n \quad [6]$$

donde  $V_1, V_2, V_n$  son las velocidades para las tuberías 1, 2, n respectivamente, n es el número de tuberías de la red y finalmente  $I$  es el valor de influencia.

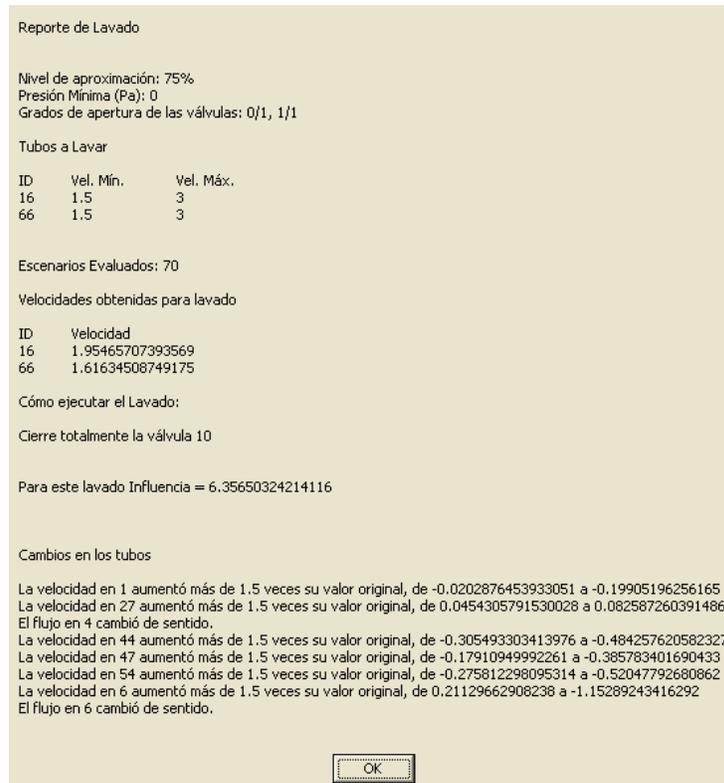
Esto quiere decir que para cada configuración el programa encontrará un valor de influencia el cual representará un valor; al realizar una nueva configuración se encontrará un nuevo valor de influencia el cual será comparado con el anterior y deberán diferir con un máximo de error establecido por el usuario (aproximación). Si los valores de influencia cumplen con la aproximación el programa habrá encontrado su solución objetivo la cual corresponderá a la función que mayor valor de influencia tenga.

### 3.3.2.8. Reporte de Lavado

En los casos en los que el programa logra encontrar una solución para las solicitudes realizadas por el usuario, este entrega un reporte de lavado en el cual se indica de qué manera operar la red para poder realizar el lavado en las tuberías solicitadas. En este reporte se obtienen datos importantes para realizarlos en campo tales como:

- Velocidades finales alcanzadas en los tubos a lavar.
- Tubos que aumentan o disminuyen su velocidad por más de un factor de 1,5.
- Los tubos en los que el flujo cambia de dirección, debido al cambio de presiones.
- Válvulas a abrir o cerrar.

En la Figura 6 se observa un reporte de lavado típico obtenido al lavar una o varias tuberías de una red R-28. La red R-28 es una red desarrollada en el CIACUA para desarrollar investigaciones hidráulicas en relación con lo que sucede dentro de las redes de distribución.



**Figura 6. Reporte de Lavado red R-28 (Programa Lavado).**

## 4. METODOLOGÍA Y RESULTADOS.

### 4.1. Software Utilizado para la Modelación

Para el desarrollo de este proyecto fue necesario el uso de herramientas de programación en redes de distribución de agua potable que permitieran observar las condiciones hidráulicas que se presentaban al interior de las tuberías, para de esta forma determinar cuáles eran las variables que se presentaban al generar algún cambio en la operación de las redes de distribución. La herramienta REDES fue empleada en el desarrollo de la información de esta tesis para lograr observar los diferentes casos de análisis; este programa fue desarrollado en el Centro de Investigaciones en Acueducto y Alcantarillados (CIACUA) del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes.

EL programa REDES es una herramienta amigable con el usuario que permite observar todas las condiciones de la red; de esta forma el usuario puede conocer fácilmente las condiciones hidráulicas de las tuberías, tales como diámetro, velocidad, pérdidas menores, entre otros, los nudos de la red en los cuales se pueden conocer sus demandas, cabeza piezométrica, entre otros, los embalses de los cuales se puede conocer su altura piezométrica y finalmente las válvulas de las cuales se conoce el diámetro y su estado. De esta forma el programa permite determinar fácilmente las condiciones hidráulicas de interés para este proyecto.

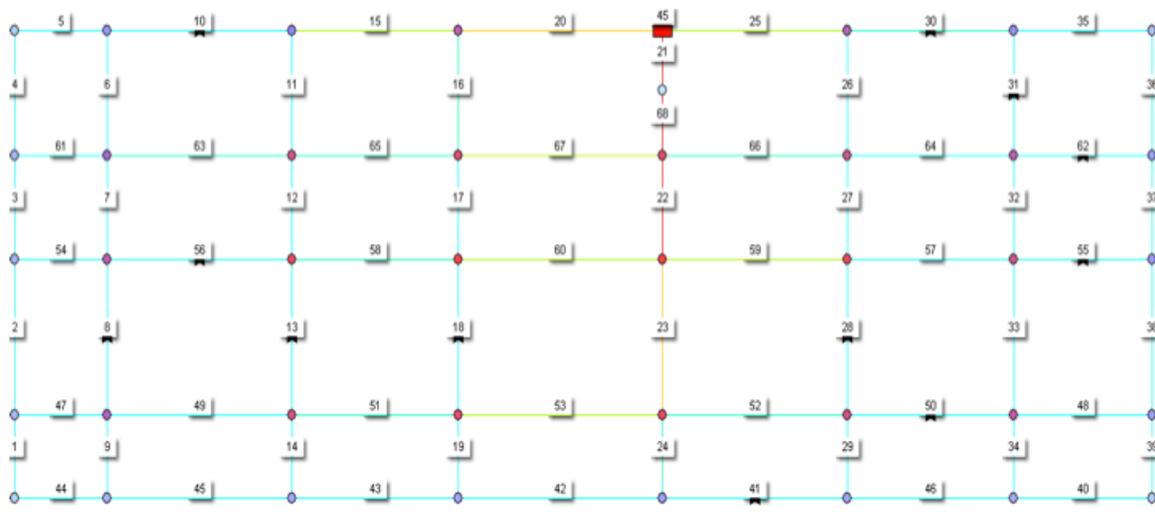
En el programa REDES a inicios del año 2011, fue desarrollada una herramienta que permite operar las redes bajo diferentes restricciones en cuanto a la velocidad promedio que se genera al interior de cada una de las tuberías; esta herramienta fue desarrollada en el CIACUA y se llamó "LAVADO". Esta herramienta de programación será indispensable para el desarrollo de este proyecto, ya que permitirá observar bajo qué casos se genera desprendimiento de biopelícula al cerrar una o más tuberías de una red cualquiera.

### 4.2. La Red R-28

La red R-28 es una red desarrollada en el CIACUA para desarrollar investigaciones hidráulicas en relación con lo que sucede dentro de las redes de distribución. La red que se utilizó en este

proyecto es la R-28 con algunas modificaciones específicas en cuanto a la ubicación de las válvulas; esta configuración específica fue desarrollada por Eric Rothstein para su tesis “Planeación de lavado unidireccional en redes de distribución de agua: Una aproximación”.

La red R-28 cuenta con 68 tuberías de diferentes diámetros y longitudes, 39 nudos con diferentes demandas y alturas igual a cero, 1 válvulas de diámetros idénticos y 1 válvula de diámetro diferente, 1 embalse ubicado 15 metros por encima el resto de los nudos de la red. En la figura 7 se presenta una imagen de la R-28 en las condiciones mencionadas anteriormente.



**Figura 7. Red R-28 original sin modificaciones**

Para poder observar las variaciones y posible desprendimiento de las biopelículas que ocurre en una red de distribución de agua potable en los casos que existe cierre de alguna(s) tubería(s) debido a daño o mantenimiento de las mismas, se eliminaron tuberías aleatoriamente en la red simulando lo que sucedería en campo en estos casos específicos.

Se realizaron 5 pruebas de tuberías ubicadas en diferentes puntos de la red; para esto se observó las variaciones en diferentes escenarios al eliminar las tuberías. Adicionalmente se observó lo que sucedía en los casos que la demanda era reducida a un 50, 30 10% de la demanda original que tenía la red. Los 5 diferentes casos analizados en la red se presentan a continuación:

#### 4.2.1. Caso 1

En este ensayo se eliminaron 2 tuberías lejanas entre sí de la red; estas tuberías fueron la 16 y la 33. En la Figura 8 se ilustra la configuración de la red R-28 para este caso.

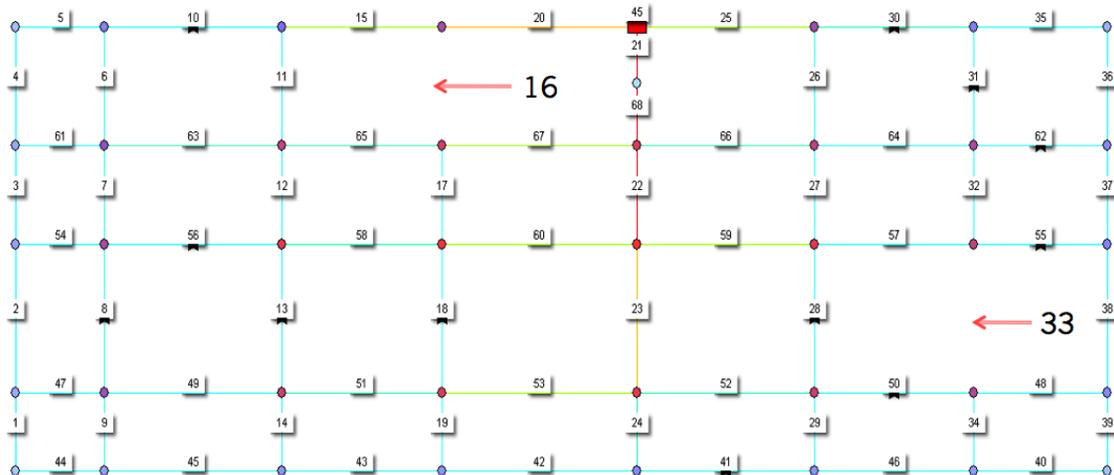


Figura 8. Red R-28 sin las Tuberías 16 y 33.

#### 4.2.2. Caso 2

En el caso 2 se eliminó 1 tuberías; esta tubería fue la 23. En la Figura 9 se ilustra la configuración de la red R-28 para este caso.

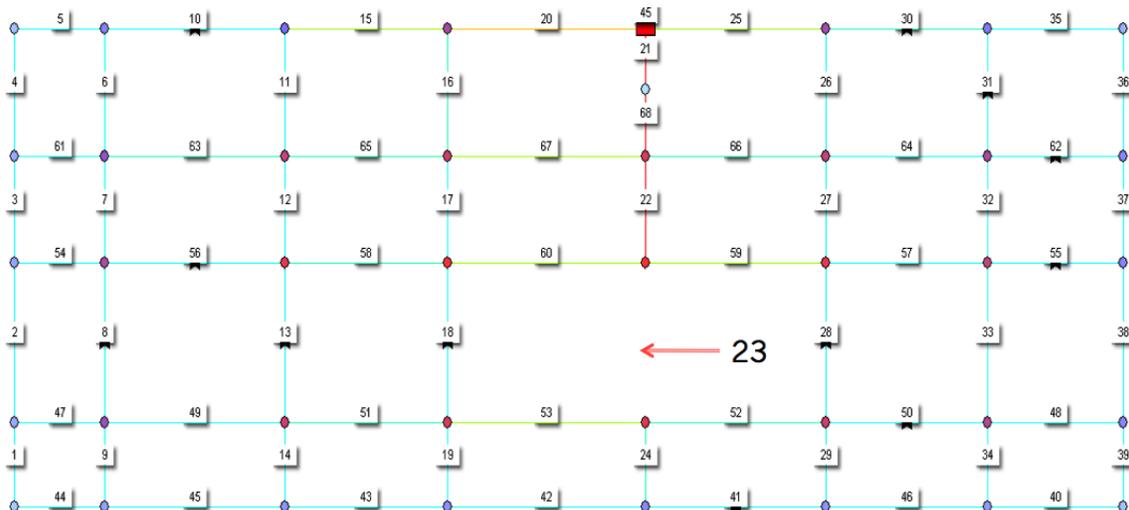


Figura 9. Red R-28 sin la Tubería 23.

### 4.2.3. Caso 3

En este ensayo se eliminó una tubería; esta tubería fue la 25. En la Figura 10 se presenta la configuración final de la red R-28 para este caso.

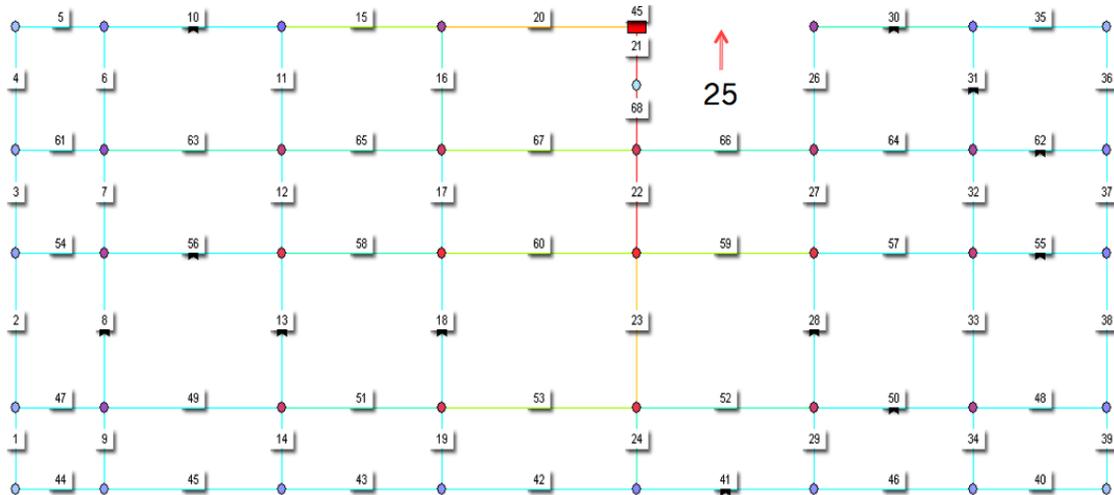


Figura 10. Red R-28 sin la Tubería 25.

### 4.2.4. Caso 4

Para el caso numeró 4 se eliminó la tubería 2. En la Figura 11 se ilustra la configuración de la red R-28 para este caso.

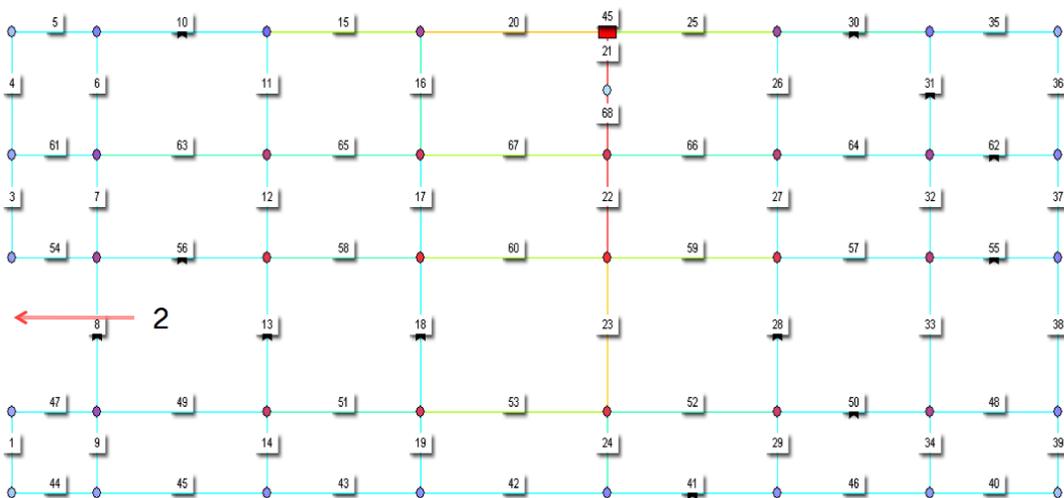


Figura 11. Red R-28 sin la Tubería 2.

#### 4.2.5. Caso 5

En este ensayo se eliminó una tubería; estatuberíasfue la 46. En la Figura 12 se ilustra la configuración de la red R-28 para este caso.

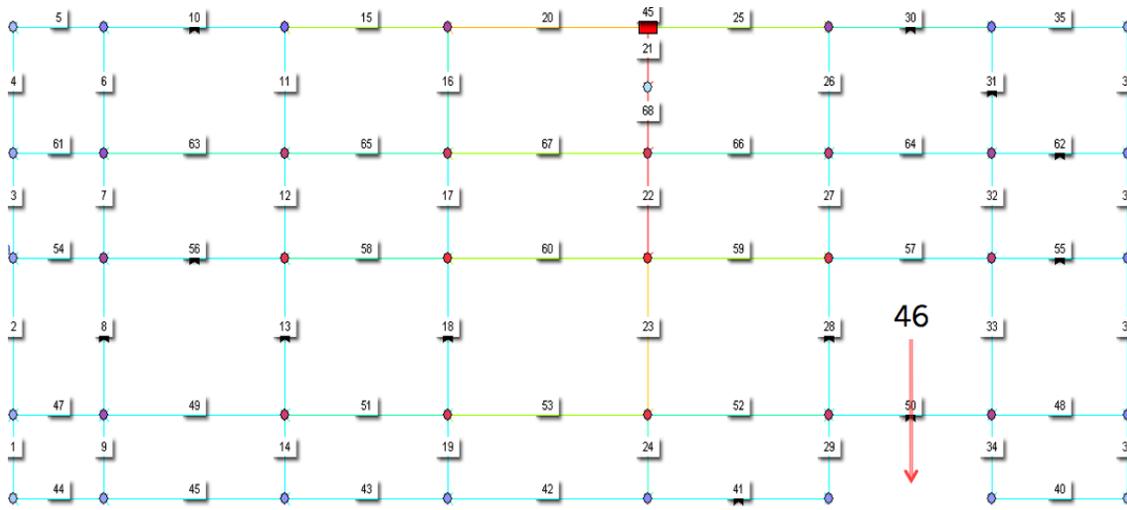


Figura 12. Red R-28 sin la Tubería 46.

#### 4.3. Metodología de Análisis

Para poder realizar un análisis adecuado en los diferentes casos de estudio de redes sin una o dos tuberías fue necesario inicialmente evaluar los resultados relacionados con la velocidad y dirección del flujo en el programa REDES; por esta razón se introdujo la red R-28 sin ninguna modificación y se obtuvieron los valores de la velocidad y de la dirección del flujo en cada una de las tuberías para la red original. Luego después de obtener estos resultados se introdujeron los 5 casos de redes sin una o dos tuberías y se obtuvieron la velocidad y la dirección de flujo para cada caso de interés.

Después de realizar la primera prueba correspondiente la red R-28 con demandas originales, y modificaciones de tuberías, se continuó con las segunda prueba la cual consistía en realizar el mismo procedimiento que para la prueba 1, pero reduciendo todas las demandas al 50% de la demanda original. La tercera y cuarta prueba correspondieron a la misma metodología de la

prueba 1 y 2, pero reduciendo las demandas de todos los nodos al 30% y 10% de la demanda original respectivamente.

Según lo anterior fue posible obtener los resultados de todas las velocidades y direcciones del flujo para todas las tuberías de los 5 casos de la red R-28 sin alguna(s) tubería(s) y la original, para cuatro pruebas diferentes. Para poder entender de forma adecuada en qué consistía cada una de las pruebas se realizará una breve descripción a continuación:

### Prueba 1

Uso del Programa REDES para identificar las velocidades y direcciones de flujo de todas las tuberías de la red R-28 con demandas originales para:

- R-28 Original sin modificaciones
- Caso 1 (Sin tubos 16 y 33)
- Caso 2 (Sin tubo 23)
- Caso 3 (Sin tubo 25)
- Caso 4 (Sin tubo 2)
- Caso 5 (Sin tubo 46)

### Prueba 2

Uso del Programa REDES para identificar las velocidades y direcciones de flujo de todas las tuberías de la red R-28 con demandas reducidas al 50%, en los siguientes casos:

- R-28 Original con demandas reducidas
- Caso 1 (Sin tubos 16 y 33)
- Caso 2 (Sin tubo 23)
- Caso 3 (Sin tubo 25)
- Caso 4 (Sin tubo 2)
- Caso 5 (Sin tubo 46)

### Prueba 3

Uso del Programa REDES para identificar las velocidades y direcciones de flujo de todas las tuberías de la red R-28 con demandas reducidas al 30%, en los siguientes casos:

- R-28 Original con demandas reducidas
- Caso 1 (Sin tubos 16 y 33)
- Caso 2 (Sin tubo 23)
- Caso 3 (Sin tubo 25)
- Caso 4 (Sin tubo 2)
- Caso 5 (Sin tubo 46)

### Prueba 4

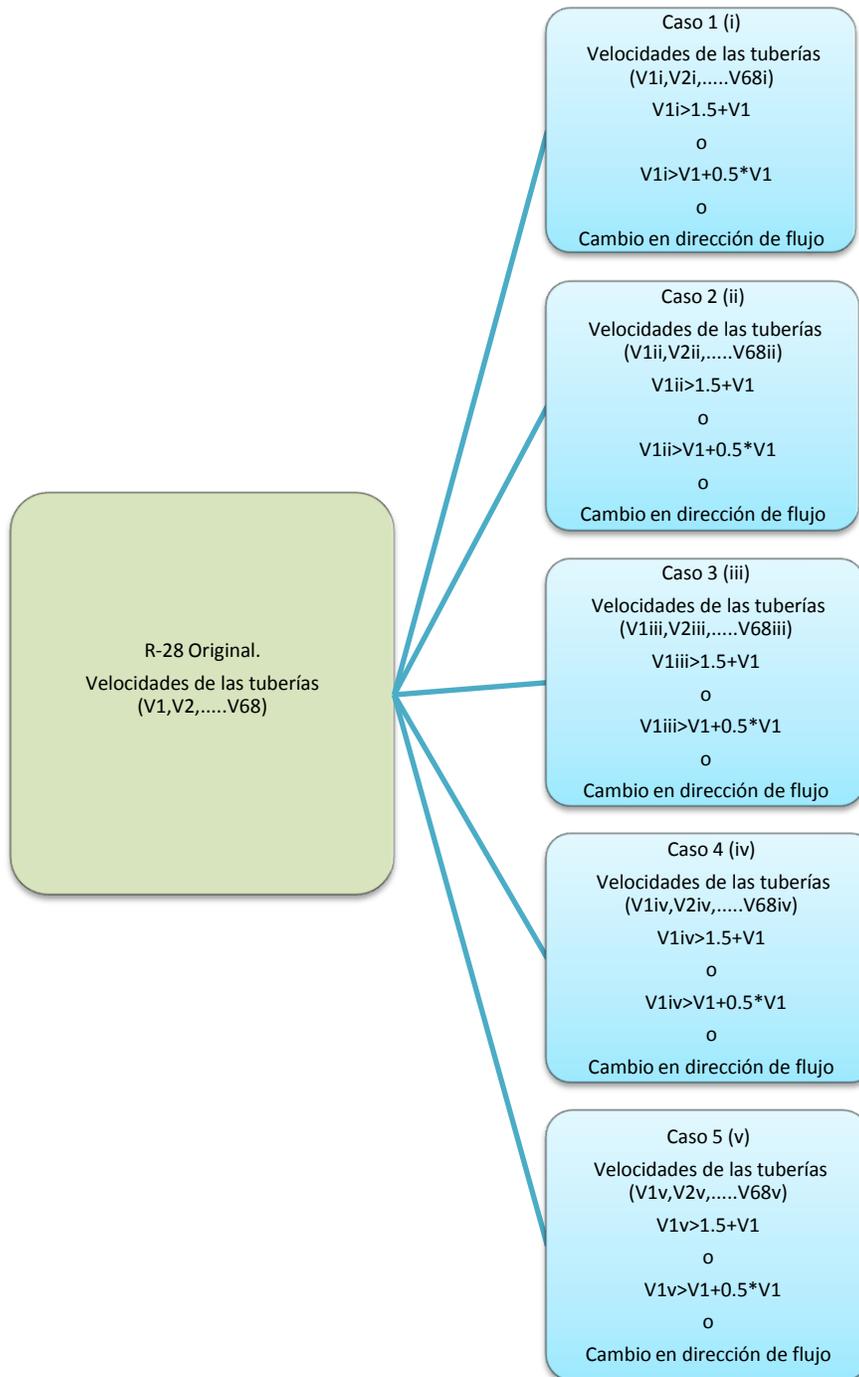
Uso del Programa REDES para identificar las velocidades y direcciones de flujo de todas las tuberías de la red R-28 con demandas reducidas al 10%, en los siguientes casos:

- R-28 Original con demandas reducidas
- Caso 1 (Sin tubos 16 y 33)
- Caso 2 (Sin tubo 23)
- Caso 3 (Sin tubo 25)
- Caso 4 (Sin tubo 2)
- Caso 5 (Sin tubo 46)

Al obtener todos los resultados de las pruebas 1, 2, 3 y 4 se seleccionaron las tuberías que presentaban posibilidad de desprendimiento de la biopelícula, realizando una comparación con la red original de cada una de las pruebas. De esta forma se pretendía observar que sucedía si en una red original se cierra una o dos tuberías debido a mantenimiento o daño.

A continuación se resume brevemente las comparaciones realizadas para observar la posibilidad de desprendimiento de la biopelícula. En las diferentes pruebas se compararon los 5 casos mencionados anteriormente con la red original; como se mencionó anteriormente lo único que se

modifica en las diferentes pruebas es la demanda de la Red R-28. En la Figura 13 se puede observar los parámetros seguidos para realizar las pruebas:



**Figura 13. Procedimiento utilizado para observar los casos de desprendimiento de Biopelícula en las diferentes pruebas.**

Al determinar todas las tuberías de los diferentes casos en cada una de las pruebas que presentaban problemas de desprendimiento de la biopelícula se escogían únicamente el 20% del total de tuberías de la red que presentaban desprendimiento de la biopelícula. De esta forma el 20% de tuberías de una red de 68 tuberías corresponde a 13 tuberías; por esta razón en los casos que se presentaba mayor número de tuberías con problemas de desprendimiento, se tomaban únicamente las 13 con mayores problemas.

Al obtener el 20% de las tuberías de la Red R-28 con mayor problema de desprendimiento de biopelícula se procedía a evaluar estas tuberías bajo ciertas restricciones en el programa de Lavado. Las restricciones utilizadas en el programa correspondían a:

- Rango de velocidades entre 0,1 y 1,5 m/s para las tuberías a evaluar.
- No existencia de Hidrantes en la Red.
- Nivel de Aproximación del 75%.
- Presión mínima de 0 para garantizar demandas en los nodos.
- Estado de las válvulas abiertas en un 100%.

#### **4.4. Resultados**

Los resultados que se presentarán a continuación corresponden a los 5 casos presentados para la Red R-28, en las pruebas 1, 2, 3 y 4. Con el fin de realizar una explicación clara de los resultados, estos se dividirán en cada una de las pruebas y en estas se explicarán cada uno de los casos.

##### **4.4.1. Prueba 1**

La prueba 1 corresponde al análisis de la Red R-28 con las demandas originales. De esta forma se presentarán los resultados obtenidos para cada uno de los casos evaluados; en estos se tendrán en cuenta las modelaciones realizadas en Excel, seguidos por los resultados obtenidos en el programa de Lavado, teniendo en cuenta la metodología mencionada.

#### 4.4.1.1. Caso 1

En el caso 1 se evaluó la Red R-28 sin las tuberías 16 y 33. En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos en cuanto a las tuberías con problema de desprendimiento de la biopelícula.

ID	VELOCIDAD (m/s)	$\Delta$ Velocidad (m/s)	$\Delta$ Velocidad50%	CambioSentido	Desp. Biopelícula
1	-0.032	0.012	Si	No	Si
6	0.32	0.109	Si	No	Si
27	0.121	0.076	Si	No	Si
38	0.695	0.337	Si	No	Si
67	-1.964	0.679	Si	No	Si

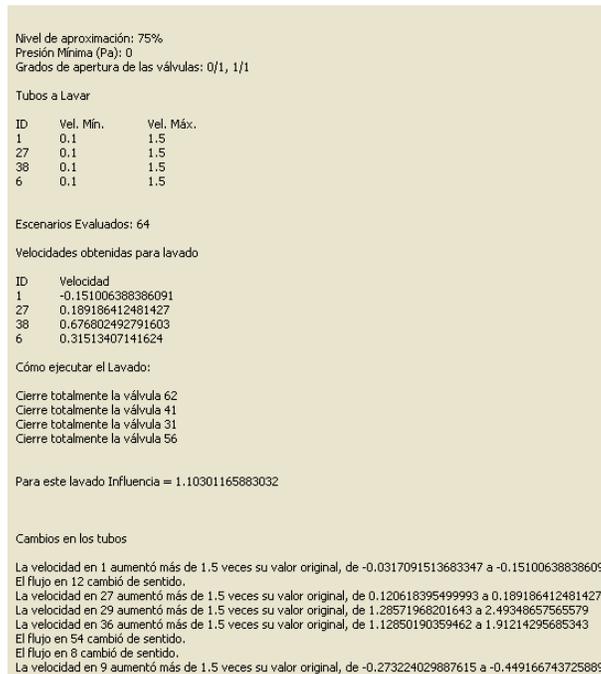
**Tabla 1. Tuberías con problemas de desprendimiento de biopelícula en el Caso 1 de la Prueba 1.**

En este caso se presentan 5 tuberías con posibilidad de desprendimiento de biopelícula; de esta forma se introducen la red al programa de lavado, con las restricciones mencionadas anteriormente para las tuberías de la Tabla 1. Al realizar el primer ensayo de lavado se obtienen los resultados de la Figura 14.



**Figura 14. Error Caso 1 de la Prueba 1 para 5 tuberías evaluadas.**

Esto quiere decir que el programa no encontró bajo ningún escenario o combinación de válvulas la posibilidad de mantener las velocidades entre 0,1 y 1,5 m/s en las 6 tuberías. Ya que el programa no encuentra solución debido a que la velocidad de la tubería 67 es superior a 1,5 m/s se realiza el lavado para las 5 tuberías restantes y se obtiene el reporte de lavado de la Figura 15.



**Figura 15. Reporte de Lavado para el Caso 1 de la Prueba 1 para 4 tuberías evaluadas.**

Al utilizar el programa de Lavado en El Caso 1 de la Prueba 1 para las tuberías 1, 6, 27 y 38 se observa que el programa funciona adecuadamente debido a que logra encontrar un escenario en el cual las velocidades de estos tubos estén entre el rango de 0,1 y 1,5 m/s, sin embargo esto era de esperarse ya que las velocidades iniciales se encontraban dentro de estos rangos. Adicionalmente se debe tener en cuenta que ya que el programa intenta encontrar la mayor velocidad posible dentro del rango de velocidad introducido por el usuario, es posible que se encuentren nuevos problemas en cuenta al desprendimiento de biopelículas en otras tuberías ya que el programa operara de cualquier manera para que las velocidades de los tubos evaluados se maximicen dentro del rango introducido. Por las razones mencionadas anteriormente el programa de lavado está indicando nuevos problemas relacionados con las tuberías 12, 29, 36, 54, 8 y 9.

#### 4.4.1.2. Caso 2

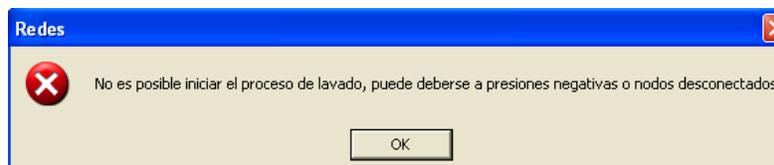
El Caso 2 de la Prueba 1 corresponde a la Red R-28 con demandas originales sin la tubería 23. En este caso se presentan 25 casos de desprendimiento de biopelícula; por esta razón se tomaron las

13 tuberías que presentaban mayor posibilidad de desprendimiento de biopelícula. En la tabla 23 se presentan estas tuberías.

ID	VELOCIDAD (m/s)	$\Delta$ Velocidad (m/s)	$\Delta$ Velocidad50%	CambioSentido	Desp. Biopelícula
2	2.237	1.805	Si	No	Si
8	2.309	1.86	Si	No	Si
13	3.755	2.954	Si	No	Si
18	4.611	3.683	Si	No	Si
28	4.766	3.352	Si	No	Si
33	2.671	2.165	Si	No	Si
38	2.242	1.884	Si	No	Si
46	-0.289	2.021	No	Si	Si
49	0.43	1.894	No	Si	Si
50	-0.143	2.028	No	Si	Si
51	0.404	2.242	No	Si	Si
52	-0.675	2.578	No	Si	Si
53	0.532	2.301	No	Si	Si

**Tabla 2. Tuberías con problemas de desprendimiento de biopelícula en el Caso 2 de la Prueba 1.**

Al obtener las 13 tuberías con mayor posibilidad de desprendimiento de biopelícula se introduce la red en el programa de Lavado. La tubería 23 corresponde a una de las tuberías principales de la red R-28 y debida a que la red original está diseñada de forma justa en cuanto a las demandas de cada uno de los nodos; de esta forma al eliminar esta tubería es imposible dar cumplimiento a las demandas requeridas en cada nodo y por lo tanto el programa de Lavado arroja un error ilustrado en la Figura 16.



**Figura 16. Error del Programa de Lavado por Presiones Negativas.**

#### 4.4.1.3. Caso 3

El Caso 3 de esta prueba corresponde a la eliminación de la tubería 25 en la Red R-28 con demandas originales. En este caso se encontraron 12 tuberías con posibilidad de desprendimiento de biopelícula y se presentan en la Tabla 3.

ID	VELOCIDAD(m/s)	$\Delta$ Velocidad(m/s)	$\Delta$ Velocidad 50%	Cambio Sentido	Desp. Biopelícula
26	-3.562	4.671	Si	Si	Si
27	-2.1	2.145	Si	Si	Si
31	-0.382	2.244	No	Si	Si
32	-0.427	1.554	No	Si	Si
33	-0.388	0.894	No	Si	Si
34	-0.791	0.419	Si	No	Si
37	-0.15	1.031	No	Si	Si
38	-0.419	0.777	No	Si	Si
39	-0.581	0.402	Si	No	Si
40	0.947	0.402	Si	No	Si
48	0.857	0.375	Si	No	Si
66	3.03	1.418	Si	No	Si

**Tabla 3. Tuberías con problemas de desprendimiento de biopelícula en el Caso 3 de la Prueba 1.**

Sin embargo la tubería 25 también corresponde a una de las tuberías principales de la red y debido a que está diseñada de forma justa para cumplir con las demandas; al eliminar esta tubería se presentan presiones negativas en la red y el programa no puede funcionar. Debido a esto se obtiene un error igual al de la Figura 16 del Caso 2 de la Prueba 1.

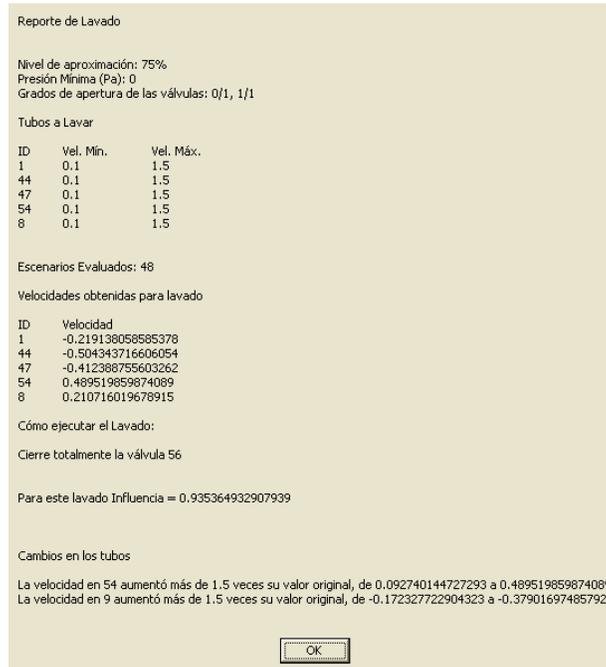
#### 4.4.1.4. Caso 4

En el Caso 4 de la Prueba 1 se eliminó la tubería 2. En la Tabla 4 se presentan las 5 tuberías con problemas de desprendimiento de biopelícula que resultaron en este caso.

ID	VELOCIDAD(m/s)	$\Delta$ Velocidad(m/s)	$\Delta$ Velocidad 50%	Cambio Sentido	Desp. Biopelícula
1	-0.173	0.153	Si	No	Si
8	0.76	0.311	Si	No	Si
44	-0.458	0.153	Si	No	Si
47	-0.459	0.28	Si	No	Si
54	0.093	0.369	No	Si	Si

**Tabla 4. Tuberías con problemas de desprendimiento de biopelícula en el Caso 4 de la Prueba 1.**

Al obtener las tuberías que se deben tener en cuenta, se introducen al programa de lavado utilizando las restricciones mencionadas en la metodología. En la Figura 17 se ilustra el reporte de lavado obtenido al realizar este procedimiento.



**Figura 17. Reporte de Lavado para el Caso 4 de la Prueba 1.**

El reporte de lavado de la Figura 17 muestra velocidades muy similares a las originales de la Tabla 4 para las tuberías 1, 8, 44 y 47; sin embargo estas aumentan en algunas unidades y ocasionan que para la tubería 54 se aumente más de 1,5 veces su valor inicial al igual que para la tubería 9. Estos resultados son similares a los del Caso 1, pero con menor número de tuberías afectadas al introducir al programa de Lavado.

#### 4.4.1.5. Caso 5

El Caso 5 corresponde a la eliminación de la tubería 46 en la Red R-28 con demandas originales. En la Tabla 5 se presentan las tuberías que tienen problemas de desprendimiento.

ID	VELOCIDAD(m/s)	$\Delta$ Velocidad(m/s)	$\Delta$ Velocidad 50%	Cambio Sentido	Desp. Biopelícula
27	-0.115	0.16	Si	Si	Si
29	-0.144	1.388	No	Si	Si
33	1.005	0.499	Si	No	Si
34	0.835	1.207	Si	Si	Si
38	0.854	0.496	Si	No	Si
39	0.347	0.526	Si	Si	Si

**Tabla 5. Tuberías con problemas de desprendimiento de biopelícula en el Caso 5 de la Prueba 1.**

Después de conocer las tuberías que presentan desprendimiento de biopelícula se introducen al programa de Lavado. La Figura 18 presenta el reporte de lavado para este caso.



**Figura 18. Reporte de Lavado para el Caso 4 de la Prueba 1.**

En este reporte de lavado se observa que para las tuberías 34, 38 y 39 la velocidad se mantuvo muy similar a las originales; sin embargo el programa aumentó las velocidades de los tubos 27, 29 y 33 en varios puntos. Adicionalmente se ve que realizar este lavado ocasiona problemas de desprendimiento en más de 13 tuberías adicionales. Según lo anterior operar la red bajo estas restricciones del programa de lavado ocasionaría más problemas que los que se tenían inicialmente.

#### 4.4.2. Prueba 2

La Prueba 2 corresponde a la Red R-28 con las demandas reducidas al 50%; en esta prueba se analizarán todos los casos de eliminación de una o dos tuberías para observar que sucedería si estas tuberías fueran cerradas por daño o mantenimiento.

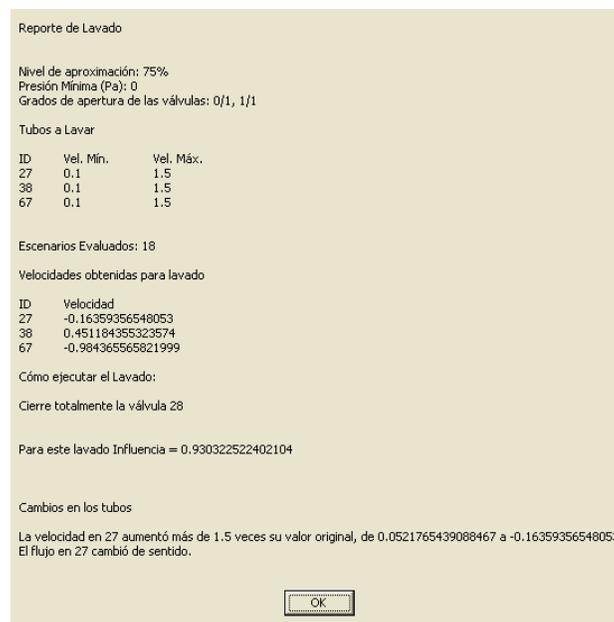
##### 4.4.2.1. Caso 1

En el Caso 1 de la Prueba 2 se eliminaron las tuberías 16 y 33 de la Red R-28 con las demandas reducidas en un 50%. En la Tabla 6 se presentan las tuberías con problemas de desprendimiento.

ID	VELOCIDAD(m/s)	$\Delta$ Velocidad(m/s)	$\Delta$ Velocidad 50%	Cambio Sentido	Desp. Biopelícula
27	0.052	0.041	Si	No	Si
38	0.338	0.162	Si	No	Si
67	-0.981	0.338	Si	No	Si

**Tabla 6. Tuberías con problemas de desprendimiento de biopelícula en el Caso 1 de la Prueba 1.**

Al determinar las tuberías afectadas por desprendimiento de la biopelícula se introducen al programa de Lavado. En la Figura 19 se presenta el reporte de lavado correspondiente a este caso.



**Figura 19. Reporte de Lavado para el Caso 1 de la Prueba 2.**

La Figura 19 muestra que para realizar este lavado se presenta un cambio de la dirección del flujo en la tubería 27 lo que ocasionaría un problema adicional en cuanto al desprendimiento de biopelícula; adicionalmente para las tuberías 38 y 67 no se resuelve el problema de aumento de más del 50% de velocidad ya que este programa maximiza las velocidades de los tubos.

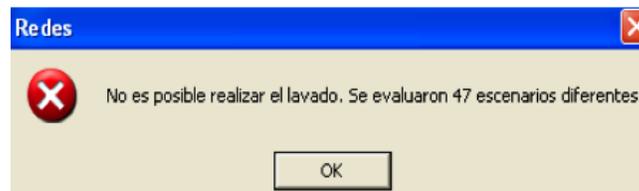
#### 4.4.2.2. Caso 2

El Caso 2 de la Prueba 2 corresponde a la Red R-28 con demandas reducidas al 50%, sin la tubería 23. Se presentaron 18 casos de desprendimiento de biopelícula; por esta razón se tomaron las 13 tuberías que presentaban mayor posibilidad de desprendimiento de biopelícula. En la tabla 7 se presentan estas tuberías.

ID	VELOCIDAD(m/s)	$\Delta$ Velocidad(m/s)	$\Delta$ Velocidad 50%	Cambio Sentido	Desp. Biopelícula
18	2.369	1.91	Si	No	Si
28	2.46	1.761	Si	No	Si
34	0.34	0.53	Si	Si	Si
39	0.366	0.458	Si	Si	Si
40	-0.182	0.457	No	Si	Si
41	-0.112	0.801	No	Si	Si
43	0.104	0.758	No	Si	Si
45	0.198	0.847	No	Si	Si
46	-0.115	0.987	No	Si	Si
49	0.164	0.896	No	Si	Si
51	0.177	1.098	No	Si	Si
52	-0.341	1.284	No	Si	Si
53	0.266	1.152	No	Si	Si

**Tabla 7. Tuberías con problemas de desprendimiento de biopelícula en el Caso 2 de la Prueba 2.**

Las 13 tuberías con mayor posibilidad de desprendimiento de biopelícula se introducen al programa de Lavado. En la Figura 20 se presentan los resultados obtenidos.



**Figura 20. Error del Programa de Lavado.**

En la Figura 20 se muestra que el programa de lavado no logra encontrar ninguna configuración de la red para que esta realice el lavado en las 13 tuberías de la Tabla 7, ya que las tuberías 18 y 28 presentan velocidades originales por encima del rango de restricciones (0,1 a 1,5 m/s). De esta forma se eliminan la tubería 18 y 28 y se evalúa en el programa de lavado las 11 tuberías restantes (Figura 21).

41	0.1	1.5
43	0.1	1.5
45	0.1	1.5
46	0.1	1.5
49	0.1	1.5
51	0.1	1.5
52	0.1	1.5
53	0.1	1.5

Escenarios Evaluados: 34

Velocidades obtenidas para lavado

ID	Velocidad
34	0.569701629572843
39	0.613620560281623
40	-0.430274065839759
41	-0.597228769534187
43	0.174221452165704
45	0.205795736924502
46	-0.592539041097351
49	-0.125261225460698
51	0.416275744102966
52	-0.90682069945278
53	-0.145795086992842

Cómo ejecutar el Lavado:

Cierre totalmente la válvula 8  
 Cierre totalmente la válvula 10  
 Cierre totalmente la válvula 18

Para este lavado Influencia = 0.977892500420421

Cambios en los tubos

La velocidad en 1 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de 0.417641266013852 a 0.707802579298589  
 La velocidad en 2 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de 1.09977110061882 a 1.90381353952456  
 La velocidad en 34 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de 0.339970124229473 a 0.569701629572843  
 La velocidad en 39 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de 0.375248349514215 a 0.613620560281623  
 La velocidad en 40 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de -0.191901855072348 a -0.430274065839759  
 La velocidad en 41 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de -0.114823857249753 a -0.597228769534187  
 La velocidad en 42 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de -0.00906725030776422 a -0.129256803692008  
 La velocidad en 44 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de 0.275038437003515 a 0.565199750288252

**Figura 21. Reporte de Lavado para el Caso 2 de la Prueba 2.**

La Figura 21 muestra que el programa de Lavado logra encontrar resultados para las 11 tuberías evaluadas; sin embargo teniendo en cuenta que el problema de desprendimiento de biopelícula radica en cambio en el sentido del flujo el programa no logra encontrar una solución.

#### 4.4.2.3. Caso 3

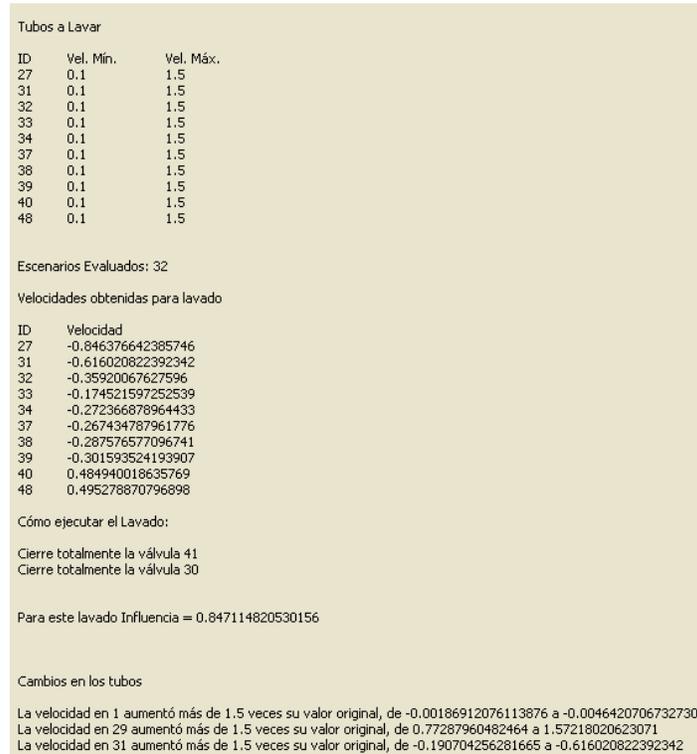
El Caso 3 de esta prueba corresponde a la eliminación de la tubería 25 en la Red R-28 con demandas reducidas en un 50%. En este caso se encontraron 14 tuberías con posibilidad de

desprendimiento de biopelícula, por lo que se tomaron las 13 con mayor problema de desprendimiento y se presentan en la Tabla 8.

ID	VELOCIDAD(m/s)	$\Delta$ Velocidad(m/s)	$\Delta$ Velocidad 50%	Cambio Sentido	Desp. Biopelícula
26	-1.769	2.313	Si	Si	Si
27	-1.036	1.047	Si	Si	Si
31	-0.19	1.127	No	Si	Si
32	-0.228	0.79	No	Si	Si
33	-0.234	0.48	No	Si	Si
34	-0.387	0.197	Si	No	Si
37	-0.089	0.527	No	Si	Si
38	-0.216	0.392	No	Si	Si
39	-0.291	0.199	Si	No	Si
40	0.475	0.2	Si	No	Si
48	0.434	0.192	Si	No	Si
50	1.422	0.475	Si	No	Si
66	1.508	0.706	Si	No	Si

**Tabla 8. Tuberías con problemas de desprendimiento de biopelícula en el Caso 3 de la Prueba 2.**

De esta forma se introducen las 13 tuberías al programa de lavado, pero debido a que las velocidades de las tuberías 26 y 66 se encuentran por encima del rango de velocidades, el programa no encuentra una solución. Adicionalmente al evaluarla para las 11 tuberías restantes el programa no encuentra una solución debido a que la velocidad de la tubería 50 se encuentra muy cerca del límite superior del rango. Para lograr una solución se eliminan las tuberías 26, 50 y 66, evaluando únicamente 10 tuberías, los resultados se ilustran en el reporte de lavado de la Figura 22.



**Figura 22. Reporte de Lavado para el Caso 3 de la Prueba 2.**

#### 4.4.2.4. Caso 4

En el Caso 4 de la Prueba 2 se eliminó la tubería 2 en la Red R-28 con demandas reducidas en un 50%. En la Tabla 9 se presentan las 5 tuberías con problemas de desprendimiento de biopelícula que resultaron en este caso.

ID	VELOCIDAD(m/s)	Δ Velocidad(m/s)	Δ Velocidad 50%	Cambio Sentido	Desp. Biopelícula
1	-0.085	0.075	Si	No	Si
8	0.396	0.169	Si	No	Si
27	0.021	0.01	Si	No	Si
47	-0.231	0.141	Si	No	Si
54	0.047	0.186	No	Si	Si

**Tabla 9. Tuberías con problemas de desprendimiento de biopelícula en el Caso 4 de la Prueba 2.**

En este caso se muestra que 4 de las 5 tuberías con problemas de desprendimiento son las mismas que se presentaban para el mismo caso en la Prueba 1; la única tubería que no es la

misma que en la prueba 1 es la 27, ya que anteriormente era la 44. En la Figura 23 se presenta el reporte de Lavado respectivo.

ID	Vel. Min.	Vel. Máx.
1	0.1	1.5
27	0.1	1.5
47	0.1	1.5
54	0.1	1.5
8	0.1	1.5

Escenarios Evaluados: 17

Velocidades obtenidas para lavado

ID	Velocidad
1	-0.10532461286782
27	-0.100766386090798
47	-0.2104387942265
54	-0.238877213045227
8	0.153527339095698

Cómo ejecutar el Lavado:

Cierre totalmente la válvula 50  
 Cierre totalmente la válvula 10  
 Cierre totalmente la válvula 30

Para este lavado Influencia = 0.934459299376965

Cambios en los tubos

La velocidad en 26 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de 0.544815806428163 a 1.12555614328129  
 La velocidad en 27 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de 0.0121676891797739 a -0.100766386090798  
 El flujo en 27 cambió de sentido.  
 La velocidad en 29 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de 0.590868033594545 a 1.35076774309071  
 El flujo en 31 cambió de sentido.  
 El flujo en 32 cambió de sentido.  
 La velocidad en 33 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de 0.246472264573254 a 0.470517107854878  
 La velocidad en 34 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de -0.189330461192371 a -0.904485211480139  
 El flujo en 36 cambió de sentido.  
 El flujo en 37 cambió de sentido.  
 El flujo en 38 cambió de sentido.  
 La velocidad en 39 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de -0.0914382049386435 a -0.420144039073289  
 El flujo en 4 cambió de sentido.  
 La velocidad en 40 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de 0.274784699380506 a 0.603490533515151  
 La velocidad en 46 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de 0.871551814888128 a 1.91541239931054  
 La velocidad en 54 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de 0.0454896337998096 a -0.238877213045227

**Figura 23. Reporte de Lavado para el Caso 4 de la Prueba 2.**

El reporte de lavado de la Figura 23 muestra que el problema del aumento del 50% de la velocidad no se solucionó; por lo tanto el problema persiste en estas tuberías y adicionalmente se presentará en tuberías adicionales tales como la 4, 40, 46, 29, 31, entre otras.

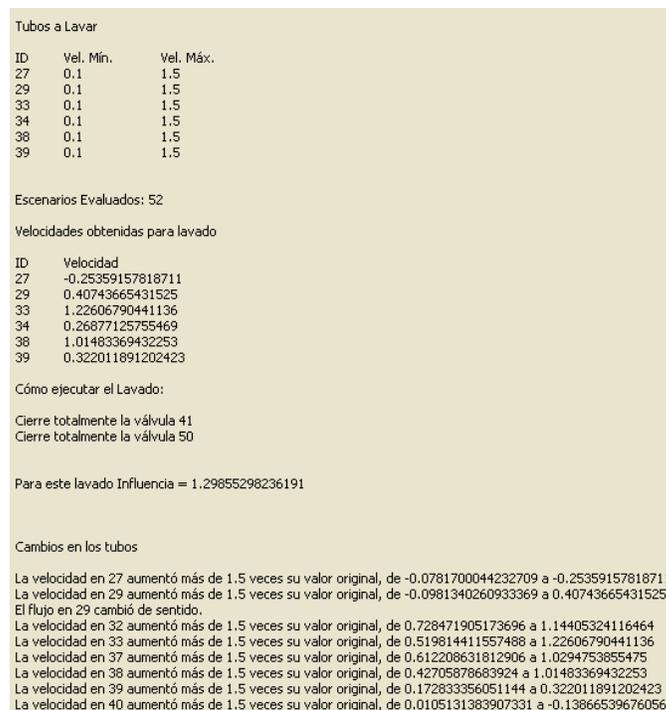
#### 4.4.2.5. Caso 5

El Caso 5 corresponde a la eliminación de la tubería 46 en la Red R-28 con demandas disminuidas en un 50%. En la Tabla 10 se presentan las 6 tuberías que tienen problemas de desprendimiento de la biopelícula.

ID	VELOCIDAD(m/s)	Δ Velocidad(m/s)	Δ Velocidad 50%	Cambio Sentido	Desp. Biopelícula
27	-0.07	0.081	Si	Si	Si
29	-0.109	0.7	No	Si	Si
33	0.5	0.254	Si	No	Si
34	0.419	0.609	Si	Si	Si
38	0.424	0.248	Si	No	Si
39	0.172	0.264	Si	Si	Si

**Tabla 10. Tuberías con problemas de desprendimiento de biopelícula en el Caso 5 de la Prueba 2.**

La Tabla 10 muestra que las tuberías que presentan desprendimiento corresponden a las mismas del Caso 5 de la Prueba 1. La Figura 24 presenta el reporte de lavado para las 6 tuberías evaluadas en este caso.



**Figura 24. Reporte de Lavado para el Caso 5 de la Prueba 2.**

En este reporte de lavado se observa que se encuentra una solución para las 6 tuberías; sin embargo para aquellas que presentan cambio en el sentido de flujo no se puede encontrar una solución en cuanto a este problema de desprendimiento de biopelícula.

### 4.4.3. Prueba 3

Para la Prueba 3 se utilizó la Red R-28 con las demandas reducidas al 30% de la original; en esta prueba se analizarán todos los casos de eliminación de una o dos tuberías con el fin de entender qué sucedería en la red en el caso de cerrar alguna de las tuberías principales o secundarias.

#### 4.4.3.1. Caso 1

En el Caso 1 de la Prueba 3 se eliminaron las tuberías 16 y 33 de la Red R-28 con las demandas reducidas al 30%. En la Tabla 11 se presentan las 5 tuberías afectadas con problemas de desprendimiento de la biopelícula.

ID	VELOCIDAD(m/s)	$\Delta$ Velocidad(m/s)	$\Delta$ Velocidad 50%	Cambio Sentido	Desp. Biopelícula
1	-0.003	0.003	Si	No	Si
27	0.033	0.023	Si	No	Si
34	-0.152	0.051	Si	No	Si
38	0.206	0.095	Si	No	Si
67	-0.588	0.202	Si	No	Si

**Tabla 11. Tuberías con problemas de desprendimiento de biopelícula en el Caso 1 de la Prueba 3.**

Al determinar las tuberías afectadas por desprendimiento de la biopelícula se introducen al programa de Lavado. En el programa debido a que la velocidad de las tuberías es menor que 0.1 m/s se pone como rango mínimo 0,001 m/s para poder conseguir que el programa encuentre una solución debido a las bajas velocidades. En la Figura 25 se presenta el reporte de lavado correspondiente a este caso.

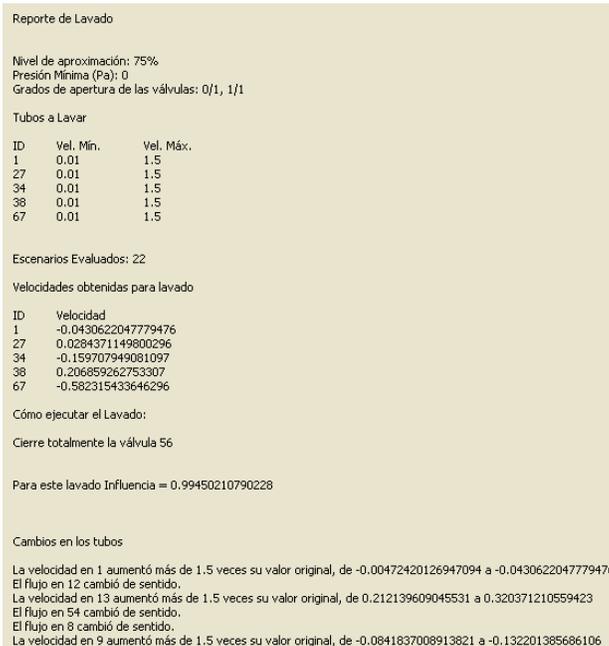


Figura 25. Reporte de Lavado para el Caso 1 de la Prueba 3.

#### 4.4.3.2. Caso 2

En este caso se elimina la tubería 23 de la Red R-28 con demandas reducidas al 30%. Se presentan 15 casos de desprendimiento de biopelícula; por esta razón se tomaron las 13 tuberías que presentaban mayor posibilidad de desprendimiento de biopelícula. En la tabla 12 se presentan estas tuberías.

ID	VELOCIDAD(m/s)	Δ Velocidad(m/s)	Δ Velocidad 50%	Cambio Sentido	Desp. Biopelícula
9	0.188	0.267	Si	Si	Si
34	0.211	0.312	Si	Si	Si
39	0.222	0.274	Si	Si	Si
40	-0.112	0.274	No	Si	Si
41	-0.059	0.485	No	Si	Si
43	0.069	0.458	No	Si	Si
45	0.121	0.506	No	Si	Si
46	-0.079	0.587	No	Si	Si
48	-0.121	0.264	No	Si	Si
49	0.099	0.534	No	Si	Si
51	0.107	0.658	No	Si	Si
52	-0.201	0.766	No	Si	Si
53	0.162	0.692	No	Si	Si

Tabla 12. Tuberías con problemas de desprendimiento de biopelícula en el Caso 2 de la Prueba 3.

Las 13 tuberías con mayor posibilidad de desprendimiento de biopelícula se introducen al programa de Lavado. En la Figura 26 se presentan los resultados obtenidos.



**Figura 26. Error del Programa de Lavado.**

En esta prueba no fue posible obtener resultados debido a que la red debido a sus bajas demandas en los nodos está manejando velocidades muy bajas en la red y el rango tiene como velocidad mínima 0.1 m/s, lo que significa que el programa no puede encontrar ninguna configuración para que las tuberías con velocidades menores a 0.1m/s puedan estar por encima de este valor.

#### 4.4.3.3. Caso 3

El Caso 3 de esta prueba corresponde a la eliminación de la tubería 25 en la Red R-28 con demandas reducidas al 30%. En este caso se encontraron 13 tuberías con posibilidad de desprendimiento de biopelícula (Tabla 13).

ID	VELOCIDAD(m/s)	$\Delta$ Velocidad(m/s)	$\Delta$ Velocidad 50%	Cambio Sentido	Desp. Biopelícula
1	0.004	0.004	Si	No	Si
26	-1.064	1.379	Si	Si	Si
27	-0.621	0.631	Si	Si	Si
31	-0.111	0.709	No	Si	Si
32	-0.133	0.48	No	Si	Si
33	-0.136	0.282	No	Si	Si
34	-0.227	0.126	Si	No	Si
37	-0.053	0.322	No	Si	Si
38	-0.128	0.239	No	Si	Si
39	-0.173	0.121	Si	No	Si
40	0.283	0.121	Si	No	Si
48	0.26	0.117	Si	No	Si
66	0.907	0.427	Si	No	Si

**Tabla 13. Tuberías con problemas de desprendimiento de biopelícula en el Caso 3 de la Prueba 3.**

Para poder operar el programa de Lavado y obtener un reporte de lavado fue necesario poner en la tubería 1 el rango desde 0.01 a 1.5 m/s y para el resto de las tuberías si se dejó el rango utilizado normalmente. En la Figura 27 se presenta el reporte de lavado obtenido para este caso.

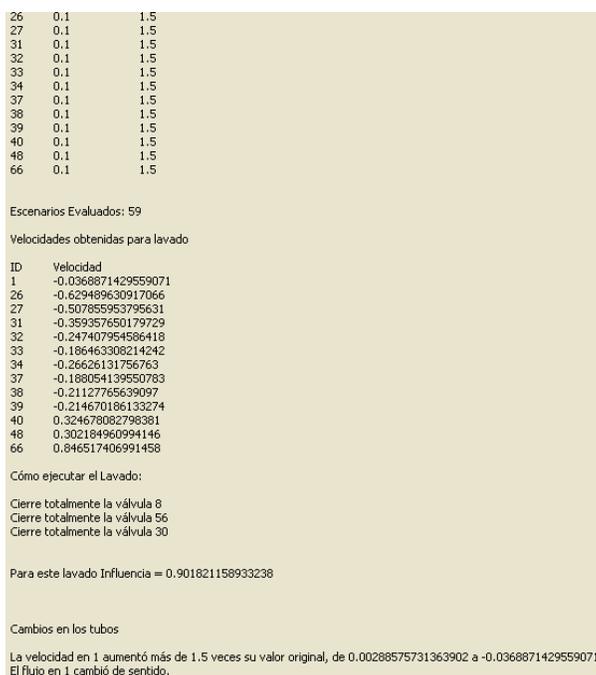


Figura 27. Reporte de Lavado para el Caso 3 de la Prueba 3.

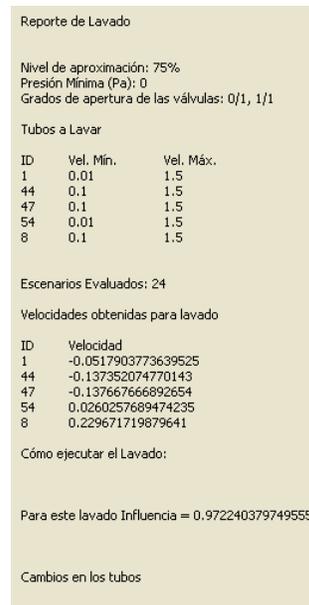
#### 4.4.3.4. Caso 4

En el Caso 4 de la Prueba 3 se eliminó la tubería 2 en la Red R-28 con demandas reducidas al 30%. En la Tabla 14 se presentan las 5 tuberías con problemas de desprendimiento de biopelícula que resultaron en este caso.

ID	VELOCIDAD(m/s)	Δ Velocidad(m/s)	Δ Velocidad 50%	Cambio Sentido	Desp. Biopelícula
1	-0.052	0.052	Si	No	Si
8	0.237	0.093	Si	No	Si
44	-0.137	0.051	Si	No	Si
47	-0.138	0.079	Si	No	Si
54	0.027	0.111	No	Si	Si

Tabla 14. Tuberías con problemas de desprendimiento de biopelícula en el Caso 4 de la Prueba 3.

En la Figura 28 se presenta el reporte de lavado correspondiente a las 5 tuberías evaluadas; en las tuberías 1 y 54 fue necesario disminuir la velocidad mínima del rango a 0.01 m/s. Los resultados no muestran ninguna variación en las velocidades de las tuberías, por esta razón el reporte no arroja ningún cambio en las tuberías de la red.



**Figura 28. Reporte de Lavado para el Caso 4 de la Prueba 3.**

#### 4.4.3.5. Caso 5

El Caso 5 corresponde a la eliminación de la tubería 46 en la Red R-28 con demandas disminuidas al 30%. En la Tabla 15 se presentan las 7 tuberías que tienen problemas de desprendimiento de la biopelícula.

ID	VELOCIDAD(m/s)	$\Delta$ Velocidad(m/s)	$\Delta$ Velocidad 50%	Cambio Sentido	Desp. Biopelícula
1	-0.001	0.001	Si	No	Si
27	-0.043	0.053	Si	Si	Si
29	-0.042	0.398	No	Si	Si
33	0.301	0.155	Si	No	Si
34	0.252	0.353	Si	Si	Si
38	0.255	0.144	Si	No	Si
39	0.103	0.155	Si	Si	Si

**Tabla 15. Tuberías con problemas de desprendimiento de biopelícula en el Caso 5 de la Prueba 3.**

En la Figura 29 se presenta el resultado del reporte del lavado en el cual también se realizó una disminución de la velocidad mínima para la tubería 1. En este lavado la velocidad en 27 y 29 se aumentan más del 50% y adicionalmente se generan varios cambios inconvenientes en otras tuberías.

Tubos a Lavar		
ID	Vel. Min.	Vel. Máx.
1	0.01	1.5
27	0.1	1.5
29	0.1	1.5
33	0.1	1.5
34	0.1	1.5
38	0.1	1.5
39	0.1	1.5

Escenarios Evaluados: 43

Velocidades obtenidas para lavado

ID	Velocidad
1	-0.0615780433490415
27	-0.129326157551271
29	0.275019741662797
33	0.369173731059895
34	0.234042522822696
38	0.29753552767562
39	0.120427366431574

Cómo ejecutar el Lavado:

Cierre totalmente la válvula 41  
 Cierre totalmente la válvula 28  
 Cierre totalmente la válvula 10

Para este lavado Influencia = 1.11607149528583

Cambios en los tubos

La velocidad en 1 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de -0.0024632328415998 a -0.0615780433490415  
 La velocidad en 27 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de -0.0487384497103444 a -0.129326157551271  
 La velocidad en 29 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de -0.0354434186940914 a 0.275019741662797  
 El flujo en 29 cambió de sentido.  
 El flujo en 4 cambió de sentido.  
 La velocidad en 40 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de 0.0065384355120958 a -0.0104194697664448  
 El flujo en 40 cambió de sentido.  
 La velocidad en 44 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de -0.088024930247788 a -0.147139740755233

**Figura 29. Reporte de Lavado para el Caso 5 de la Prueba 3.**

#### 4.4.4. Prueba 4

En la Prueba 4 se realizó una disminución de las demandas originales de la Red R-28 al 10%. En esta prueba se analizarán todos los casos de eliminación de una o dos tuberías con el fin de entender qué sucedería en la red en el caso de cerrar alguna de las tuberías principales o secundarias.

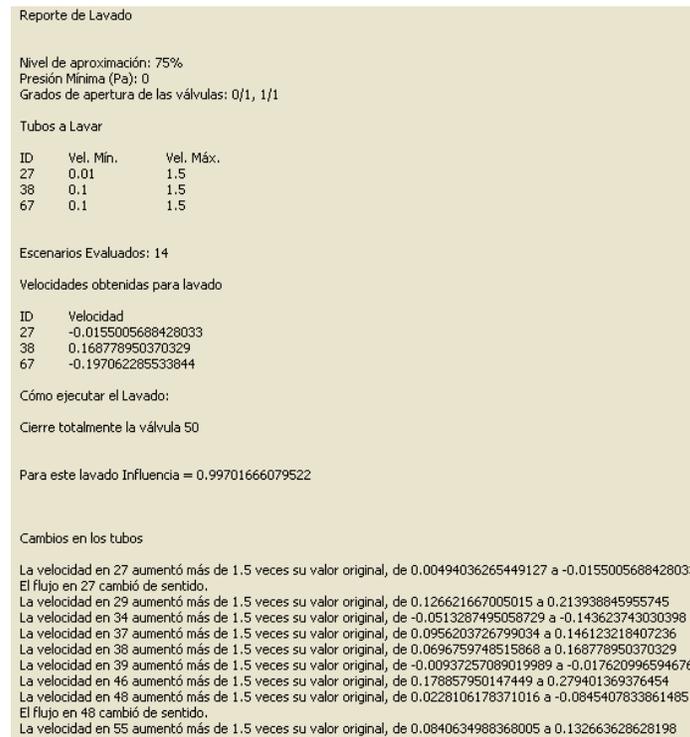
##### 4.4.4.1. Caso 1

En el Caso 1 de la Prueba 4 se eliminaron las tuberías 16 y 33 de la Red R-28 con las demandas reducidas al 10%. En la Tabla 16 se presentan las 3 tuberías afectadas con problemas de desprendimiento de la biopelícula.

ID	VELOCIDAD(m/s)	Δ Velocidad(m/s)	Δ Velocidad 50%	Cambio Sentido	Desp. Biopelícula
27	0.006	0.006	Si	No	Si
38	0.07	0.035	Si	No	Si
67	-0.197	0.068	Si	No	Si

**Tabla 16. Tuberías con problemas de desprendimiento de biopelícula en el Caso 1 de la Prueba 4.**

Es importante resaltar que se presenta desprendimiento de la biopelícula debido a que existe una variación de más del 50% de la velocidad. Las velocidades en el tubo 27 es bastante menor a 0.1 m/s, por lo tanto se reduce el rango mínimo a evaluar a 0.01m/s. La Figura 30 presenta los resultados del reporte de lavado para este caso.



**Figura 30. Reporte de Lavado para el Caso 1 de la Prueba 4.**

#### 4.4.4.2. Caso 2

En este caso se elimina la tubería 23, la cual corresponde a uno de los tubos principales de la red (Red R-28 con demandas reducidas al 10%). Se presentan 17 casos de desprendimiento de

biopelícula, por esta razón se tomaron las 13 tuberías que presentaban mayor posibilidad de desprendimiento de biopelícula (Tabla 17).

ID	VELOCIDAD(m/s)	$\Delta$ Velocidad(m/s)	$\Delta$ Velocidad 50%	Cambio Sentido	Desp. Biopelícula
34	0.071	0.104	Si	Si	Si
39	0.072	0.089	Si	Si	Si
40	-0.036	0.09	No	Si	Si
41	-0.016	0.157	No	Si	Si
42	0.001	0.107	No	Si	Si
43	0.02	0.148	No	Si	Si
45	0.041	0.168	No	Si	Si
46	-0.025	0.193	No	Si	Si
48	-0.04	0.089	No	Si	Si
49	0.031	0.175	No	Si	Si
51	0.037	0.22	No	Si	Si
52	-0.068	0.257	No	Si	Si
53	0.054	0.231	No	Si	Si

**Tabla 17. Tuberías con problemas de desprendimiento de biopelícula en el Caso 2 de la Prueba 4.**

Las 13 tuberías con mayor posibilidad de desprendimiento de biopelícula se introducen al programa de Lavado. Debido a que todas las velocidades de las tuberías se encuentran por debajo de 0.1 m/s se reduce la velocidad mínima del rango de velocidades a 0.01 m/s para todas las tuberías evaluadas. En la Figura 31 se presentan los resultados obtenidos.



**Figura 31. Reporte de Lavado para el Caso 2 de la Prueba 4.**

#### 4.4.4.3. Caso 3

En el Caso 3 de esta prueba se eliminó la tubería 25 de la Red R-28 con las demandas reducidas al 10%. En este caso se encontraron 12 tuberías con posibilidad de desprendimiento de biopelícula (Tabla 18).

ID	VELOCIDAD(m/s)	Δ Velocidad(m/s)	Δ Velocidad 50%	Cambio Sentido	Desp. Biopelícula
26	-0.354	0.457	Si	Si	Si
27	-0.206	0.206	Si	Si	Si
31	-0.042	0.242	No	Si	Si
32	-0.052	0.17	No	Si	Si
33	-0.049	0.101	No	Si	Si
34	-0.077	0.044	Si	No	Si
37	-0.011	0.098	No	Si	Si
38	-0.039	0.074	No	Si	Si
39	-0.057	0.04	Si	No	Si
40	0.093	0.039	Si	No	Si
48	0.084	0.035	Si	No	Si
66	0.303	0.144	Si	No	Si

**Tabla 18. Tuberías con problemas de desprendimiento de biopelícula en el Caso 3 de la Prueba 4.**

Como se puede observar en la Tabla 18 la mayoría de las tuberías tienen las velocidades por debajo de 0.1 m/s; por esta razón se baja la velocidad mínima del rango a 0.01 m/s. En la Figura 32 se presentan los resultados obtenidos para este caso en el reporte de lavado

ID	Vel. Min.	Vel. Máx.
26	0.01	1.5
27	0.01	1.5
31	0.01	1.5
32	0.01	1.5
33	0.01	1.5
34	0.01	1.5
37	0.01	1.5
38	0.01	1.5
39	0.01	1.5
40	0.01	1.5
48	0.01	1.5
66	0.01	1.5

Escenarios Evaluados: 25

Velocidades obtenidas para lavado

ID	Velocidad
26	-0.416297820798441
27	-0.249744501657648
31	-0.0243545273083533
32	-0.023200992538998
33	0.130051970563256
34	-0.158040422452208
37	0.0784414938717097
38	-0.031566402793417
39	-0.0734976997732856
40	0.110166998661662
48	0.0599278665989346
66	0.335477068546497

Cómo ejecutar el Lavado:  
 Cierre totalmente la válvula 55  
 Cierre totalmente la válvula 50

Para este lavado Influencia = 0.997617175582281

Cambios en los tubos

La velocidad en 29 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de 0.158652923827156 a 0.251013191001084  
 La velocidad en 33 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de -0.0433782325479783 a 0.130051970563256

Figura 32. Reporte de Lavado para el Caso 3 de la Prueba 4.

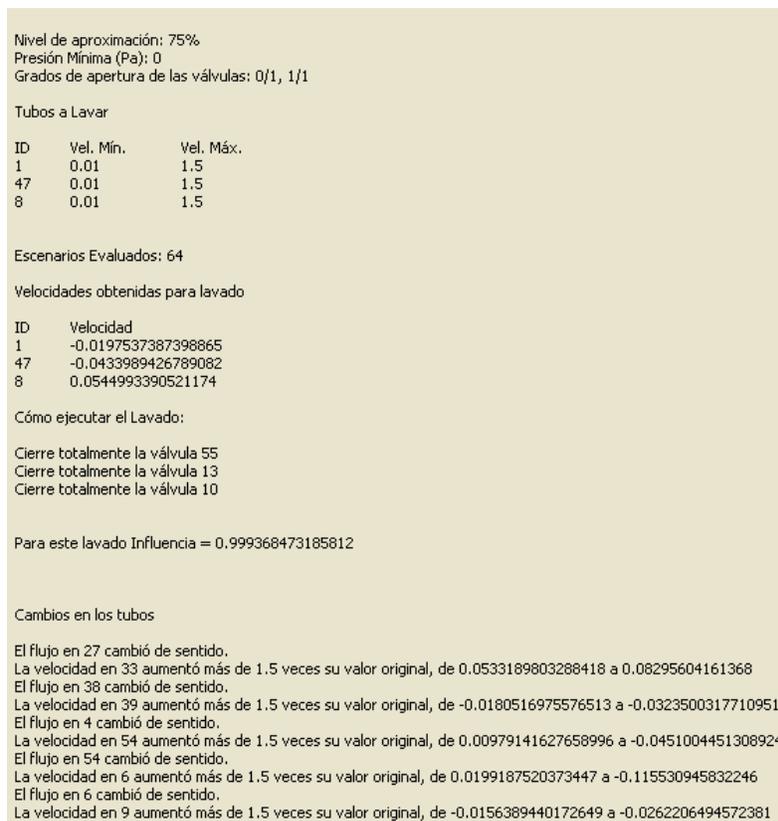
#### 4.4.4.4. Caso 4

En el Caso 4 de la Prueba 4 se eliminó la tubería 2 en la Red R-28 con demandas reducidas al 10%. En la Tabla 19 se presentan las 3 tuberías con problemas de desprendimiento de biopelícula que resultaron en este caso.

ID	VELOCIDAD(m/s)	Δ Velocidad(m/s)	Δ Velocidad 50%	Cambio Sentido	Desp. Biopelícula
1	-0.017	0.014	Si	No	Si
8	0.08	0.03	Si	No	Si
47	-0.046	0.03	Si	No	Si

Tabla 19. Tuberías con problemas de desprendimiento de biopelícula en el Caso 4 de la Prueba 4.

La Figura 32 presenta el reporte de lavado obtenido para este caso. La velocidad menor del rango de velocidades utilizado fue necesario disminuirla a 0.01 m/s con el fin de obtener resultados en el programa de Lavado igual que en casos anteriores. Las velocidades en el tubo 47 varían en 0.04 m/s aproximadamente; debido a esto se generan variaciones en tuberías adicionales como la 6, 27, 38 y 54 que podrían afectar desprendimiento de biopelícula que anteriormente no se generaba.



**Figura 33. Reporte de Lavado para el Caso 4 de la Prueba 4.**

#### 4.4.4.5. Caso 5

El Caso 5 corresponde a la eliminación de la tubería 46 en la Red R-28 con demandas disminuidas al 10%. En la Tabla 20 se presentan las 5 tuberías que tienen problemas de desprendimiento de la biopelícula.

ID	VELOCIDAD(m/s)	Δ Velocidad(m/s)	Δ Velocidad 50%	Cambio Sentido	Desp. Biopelícula
27	-0.015	0.015	Si	No	Si
33	0.1	0.048	Si	No	Si
34	0.079	0.112	Si	No	Si
38	0.084	0.049	Si	No	Si
39	0.039	0.056	Si	No	Si

**Tabla 20. Tuberías con problemas de desprendimiento de biopelícula en el Caso 5 de la Prueba 4.**

En la Figura 33 se presenta el resultado del reporte del lavado en el cual también se realizó una disminución de la velocidad mínima para todas las tuberías evaluadas. En este lavado la velocidad de las tuberías varían y por lo tanto se generan cambios en las velocidades de tuberías que anteriormente no se tenían en cuenta.

Tubos a Lavar

ID	Vel. Min.	Vel. Máx.
27	0.01	1.5
33	0.01	1.5
34	0.01	1.5
38	0.01	1.5
39	0.01	1.5

Escenarios Evaluados: 29

Velocidades obtenidas para lavado

ID	Velocidad
27	-0.0618215056577273
33	0.245513567493201
34	0.0552738538471136
38	0.202666752253581
39	0.0628827759042893

Cómo ejecutar el Lavado:

Cierre totalmente la válvula 8  
Cierre totalmente la válvula 50

Para este lavado Influencia = 1.0050451544384

Cambios en los tubos

El flujo en 1 cambió de sentido.  
La velocidad en 2 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de 0.0432209577093301 a 0.0741629809466502  
La velocidad en 27 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de -0.0162886612741608 a -0.0618215056577273  
La velocidad en 29 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de -0.0112701092717526 a 0.0222509923170317  
El flujo en 29 cambió de sentido.  
La velocidad en 32 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de 0.146955624053746 a 0.229332639401078  
La velocidad en 33 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de 0.102883056945134 a 0.245513567493201  
La velocidad en 37 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de 0.120060957675275 a 0.205531267152974  
La velocidad en 38 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de 0.0846568791517743 a 0.202666752253581  
La velocidad en 39 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de 0.0392412157898268 a 0.0628827759042893  
La velocidad en 40 aumentó más de 1.5 veces su valor original, de -0.00257191690138397 a -0.0262134770159174  
El flujo en 47 cambió de sentido.

**Figura 34. Reporte de Lavado para el Caso 5 de la Prueba 4.**

#### 4.4.5. Comparación de las Pruebas 1, 2, 3 y 4

Para poder observar la variación entre la cantidad de tuberías que presentaban desprendimiento de la biopelícula en los diferentes casos de cada una de las pruebas realizadas se presenta matriz comparativa que indica como variaron el número de tuberías afectadas (Tabla 21).

P/C	Caso 1 (Sin Tubos 16 y 33)	Caso 2 (Sin Tubo 23)	Caso 3 (Sin Tubo 25)	Caso 4 (Sin Tubo 2)	Caso 5 (Sin Tubo 46)
Prueba 1 (Demandas Originales)	5	25	12	5	6
Prueba 2 (Demandas Reducidas al 50%)	3	18	14	5	6
Prueba 3 (Demandas Reducidas al 30%)	5	15	13	5	7
Prueba 4 (Demandas Reducidas al 10%)	3	17	12	3	5

**Tabla 21. Matriz del número de tuberías afectadas por desprendimiento de biopelícula en los diferentes casos de las pruebas realizadas.**

Utilizando la Tabla 21 se pueden obtener el número de casos de desprendimiento de biopelícula que se presentan en cada uno de los cinco casos evaluados en las cuatro pruebas. La Figura 35 representa las curvas del número de tuberías afectadas para las diferentes pruebas en cada uno de los casos, En esta figura se puede apreciar como la Prueba 3 presenta un mayor número de tuberías afectadas que las Prueba 1 y 2 para los casos 1 y 5; de esta forma se puede tener en cuenta que una red muy justa en cuanto a su capacidad hidráulica y las demandas exigidas en cada uno de los nudos puede causar muchos casos de desprendimiento de biopelícula en caso de cierre de una tubería principal (Caso 2 y 3); de esta forma es importante tener en cuenta que las redes siempre deberán contar con un rango de flexibilidad para garantizar que en caso de que un mantenimiento o una daño de cualquiera de sus tuberías no causen problemas tan grandes de desprendimiento de la biopelícula y termine afectando a un gran porcentaje de usuarios de la red.

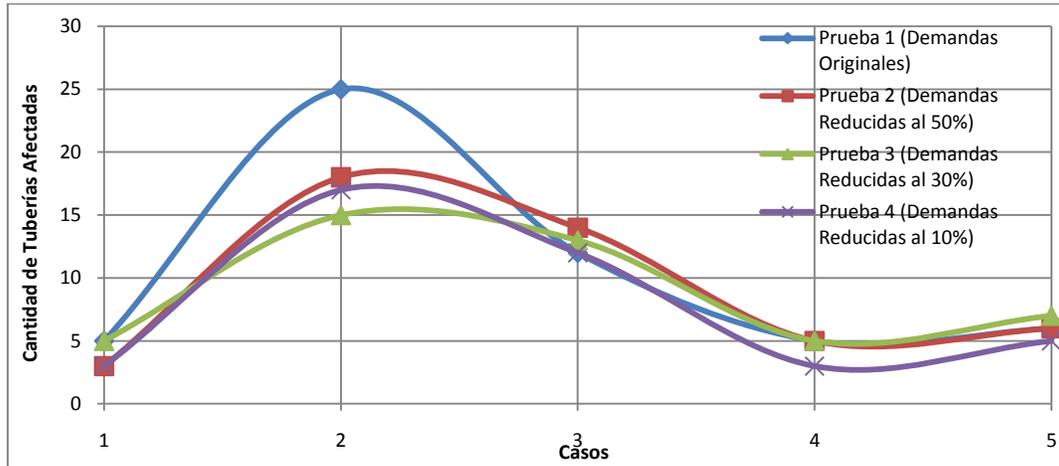


Figura 35. Curva de tuberías Afectadas para cada caso en las diferentes Pruebas.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El programa de Lavado es una herramienta muy útil para observar cada una de las tuberías en las cuales se presenta problemas relacionados con el desprendimiento de la biopelícula. Esto se debe a que en el reporte de lavado se indica cada una de las tuberías en las cuales la velocidad aumentó más de 1.5 veces su velocidad y en cuales se presentó un cambio en la dirección de flujo. Gracias a este reporte se podría determinar exactamente cuales usuarios se verán afectados por problemas de desprendimiento y por lo tanto será posible enviar advertencias a estos antes de que se realice un mantenimiento o en caso de daño se podrá dar aviso inmediato para que estos usuarios eviten el uso del recurso por un periodo determinado, con el fin de evitar posibles enfermedades relacionadas con los microorganismos que seguramente se encuentren en las biopelículas que se han desarrollado en la red, ya que como se ha determinado es imposible operar una red de tal manera que no se generen biopelículas; lo único que se puede lograr con la operación de la red es disminuir el espesor de la capa de la biopelícula.

Por otro lado es importante mencionar que al programa de Lavado no se le pueden introducir restricciones tales como que no se genere cambio en el sentido de flujo de una o más tuberías y tampoco se puede garantizar que no se dé un cambio de más del 50% de la velocidad de alguna de las tuberías, ya que muchas veces este cambio está por debajo de aquel que se restringe en el rango de velocidades. Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente es importante ver que para los casos en los cuales se pretende evaluar una tubería debido a que se presentó desprendimiento de biopelícula causado por un cambio en la dirección del flujo, cambios en más del 50% del valor de la velocidad o en más de 1.5 m/s, pero esta se encuentra en el rango de velocidades restringido, el programa de Lavado no es útil, ya que no permite restringir estos casos. Al evaluar las tuberías de la red en estos casos puede que genere mayor número de problemas en tuberías adicionales que anteriormente no presentaban problemas de desprendimiento.

Por otro lado operar el programa sin el uso de hidrantes limita más la posibilidad de encontrar una configuración de la red para que se pueda realizar el lavado en los casos que se quiere limitar

una tubería que presenta una velocidad mayor a 1.5 m/s (velocidad máxima del rango de restricción). Debido a esto no se logró encontrar una solución para algunos casos de las Pruebas 1 y 2, en las cuales algunas de las tuberías afectadas tenían velocidades por encima de 1,5 m/s. Para lograr encontrar una solución fue necesario no evaluar estas tuberías en el programa y solo evaluar las restantes, lo que quiere decir que estas tuberías seguirán presentando problemas de desprendimiento, pues es imposible encontrar una configuración de la red para que esto no suceda.

Adicionalmente se debe tener en cuenta la función objetivo que utiliza el programa de Lavado busca maximizar las velocidades de cierta tubería dentro de un rango establecido por el usuario; esta función es contraria a lo que se busca al evaluar escenarios en los cuales no se presente desprendimiento de la biopelícula ya que al introducir tuberías a evaluar lo que se busca es que las velocidades sean mínimas dentro de cierto rango y de esta forma no se presenten estos episodios de desprendimiento. Teniendo en cuenta esta contradicción entre el programa y lo que se busca en este proyecto es necesario para estudios futuros desarrollar dentro del programa de Lavado la posibilidad de modificar la función objetivo para que esta busque las mínimas velocidades posibles para una tubería dentro de un rango establecido por el usuario, sin modificar las velocidades o direcciones de flujo de otras tuberías de la red.

Al evaluar la Red R-28 bajo diferentes demandas y las mismas condiciones hidráulicas, se observó que en los casos en los que la red está diseñada de forma muy justa para cumplir las demandas en los diferentes nudos y se realiza la eliminación de una o más tuberías los casos de desprendimiento de biopelícula son muy elevados, sobre todo en los casos que las tuberías eliminadas sean principales. Lo anterior quiere decir que en los casos de las RDAP que se encuentren diseñados de forma justa para cumplir las demandas y se genere un episodio de cierre por mantenimiento o daño de una tubería, asegurará que se presentaran casos de desprendimiento de biopelícula en varios sectores de la red, los cuales afectarán a un gran número de usuarios de esta. Este hallazgo indica que diseñar RDAP que no sean justos y que permitan cumplir con las demandas de diferentes formas en caso de cierre de una tubería

---

también garantizara que no se presentarán episodios de desprendimiento de la biopelícula y por lo tanto no existirá riesgo para los consumidores de agua de estas redes.

Finalmente es importante tener en cuenta que en los casos de cierre de una o más tuberías dentro de una RDAP generarán desprendimiento de biopelícula en algunas de las tuberías de esta. Por esta razón el uso de programas que indiquen las tuberías que se verán afectadas permite determinar los usuarios que se verán afectados y de esta forma generar advertencias para que los consumidores tengan mayor precaución en el uso del recurso. Adicionalmente es claro que si la RDAP no se encuentra diseñada de forma justa los episodios de desprendimiento de biopelícula serán mucho menores y por lo tanto afectaran a un menor número de usuarios en la red.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Muñoz, L.F, Saldarriaga, J.G. (2005). Veocidad de desprendimiento de las biopelículas en tuberías de distribución de agua potable. Bogotá: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

Gelves, M.F., Saldarriaga, J.G. (2005). Deterioro de la calidad del agua por el posible desprendimiento de la biopelícula en las redes de distribución de agua potable. Bogotá: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

Gamarra, A.V., Saldarriaga, J.G.(2004). Factores que favorecen el desarrollo y el crecimiento de biopelículas en las tuberías de los sistemas de distribución de agua potable. Bogotá: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

Rothstein, E.G. &Takahshi, S. (2011).Planeación de lavado unidireccional en redes de distribución de agua: Una aproximación. Bogotá: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Computación.

Álvarez, L.M., Saldarriaga, J.G. (2009). Propuesta de una metodología para el diseño optimizado de lavados hidráulicos unidireccionales en redes de distribución de agua potable.Bogotá: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

Informe de Producto 5. Estudio, investigación sobre los factores que generan la formación, crecimiento y posterior desprendimiento de biopelículas en las redes matrices de acueducto debido a la composición fisicoquímica y microbiológica del agua potable y selección de una metodología de recolección de muestras de biopelículas de acuerdo al estado del arte nacional e internacional. Fase I. (2009). Bogotá: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados- CIACUA.

Hernández, M.X., Saldarriaga, J.G. (2010). Influencia de la fuente de carbono en el desarrollo de biopelículas y su efecto hidráulico en sistemas de distribución de agua potable. Bogotá: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

Rubio, D.P. (2011). Presentación Planeación de lavado unidireccional en redes de distribución de agua: Una aproximación (Rothstein, E.G. & Takahshi, S. 2011). Bogotá: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados- CIACUA.

Toro, P., Saldarriaga, J.G. (2004). Aspectos hidráulicos para el lavado de redes de distribución de agua potable. Bogotá: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

Latorre, R.M., Saldarriaga, J.G. (2004). Efecto hidráulico de las biopelículas en tuberías de distribución de agua potable. Bogotá: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

Jorge, L. Formación de biopelículas y su impacto en los sistemas de conducción de agua. Mexico D.F. Instituto de Ingeniería. UNAM.

Vargas, A., Saldarriaga, J.G. (2008). Influencia de los materiales de tuberías en la formación de biopelículas. Bogotá: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

Donoso, A.M., Saldarriaga, J.G. (2009). Efecto de los materiales de las tuberías en la generación de biopelículas en redes de distribución de agua potable. Bogotá: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

Welter, A.B., Romero, J.M., Grumelli, Y.A., Sanchez, J.A., Ascar, G.I. La biopelícula en los procesos RBC. Córdoba. Universidad Católica de Córdoba. Campus Universitario. Facultad de Ingeniería.

---

Morato, J., Subirana, A., Carneiro, A.P. (2007). Presentación Factores que favoreces el crecimiento de biopelículas. Diseño, operación y mantenimiento de redes. Cali. Seminario Internacional de evaluación y gestión integral del riesgo en sistemas de abastecimiento de agua. Universidad Politécnica de Catalunya.