

Universidad de los Andes  
Facultad De Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental



**TESIS DE ESPECIALIZACIÓN  
INGENIERÍA DE SISTEMAS HÍDRICOS URBANOS**

**ESTUDIO SOBRE EL USO DE DIFERENTES ECUACIONES DE DISEÑO  
DE TUBERÍAS A NIVEL COLOMBIANO**

Preparado por:  
Ing. Jorge Lenin Lemus Rojano

Asesor:  
Ing. Juan Guillermo Saldarriaga Valderrama

**Informe Final Tesis**

**Bogotá, 17 de febrero de 2012**

## TABLA DE CONTENIDO<sup>1</sup>

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>6</b>
<b>1 ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.....</b>	<b>8</b>
1.1 ANTECEDENTES .....	8
1.2 OBJETIVOS .....	10
1.2.1 <i>Objetivos Generales</i> .....	10
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	10
<b>2 ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>11</b>
2.1 <i>TEXTOS DE AUTORES COLOMBIANOS</i> .....	11
2.1.1 <i>Acueductos Teoría y Diseño</i> .....	12
2.1.2 <i>Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados</i> .....	15
2.1.3 <i>Instalaciones hidrosanitarias y de gas para edificaciones</i> .....	16
2.1.4 <i>Hidráulica de Tuberías, Abastecimiento de agua, redes, riegos</i> .....	19
2.1.5 <i>Principales avances y similitud</i> .....	27
2.2 <i>NORMATIVIDAD EXISTENTE</i> .....	28
2.2.1 <i>Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS 2000</i> .....	29
2.2.2 <i>Normas de Diseño de Sistemas de Acueducto de las Empresas Públicas de Medellín</i> . ....	33
2.2.3 <i>Sistema de Información de Normalización y Especificaciones Técnicas “SISTEC” Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá</i> .....	37
2.3 <i>PROFESIONALES DE LA INGENIERÍA DEDICADOS A LA HIDRÁULICA DE REDES DE DISTRIBUCIÓN</i> . ....	38
2.3.1 <i>Ingeniero Civil Oscar Julián Cortés Rivero</i> .....	38
2.3.2 <i>Ingeniero Sanitario Gustavo Navia Paz</i> .....	40
2.3.3 <i>Ingeniera Sanitaria Paola Urrego</i> .....	42
2.3.4 <i>Ingeniero Civil Fredy Nicolás Angulo Hernández</i> .....	44
2.3.5 <i>Ingeniera Civil María Elvira Guevara</i> .....	48
2.4 <i>MODELACIÓN DE RED Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS CON DIFERENTES ECUACIONES</i> . ....	51
2.4.1 <i>Características de la Red</i> .....	52
2.4.2 <i>Primera simulación</i> .....	55
2.4.3 <i>Segunda simulación</i> .....	57
2.4.4 <i>Tercera simulación</i> .....	59
<b>3 METODOLOGÍA.....</b>	<b>61</b>
<b>4 CONCLUSIONES .....</b>	<b>63</b>
<b>5 RECOMENDACIONES .....</b>	<b>66</b>
<b>6 BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>67</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>68</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 DIAGRAMA DE MOODY PARA EL CALCULO DEL FACTOR DE FRICCIÓN. (TOMADO DE <a href="http://people.msoe.edu/~tritt/be382/graphics/moody.png">HTTP://PEOPLE.MSOE.EDU/~TRITT/BE382/GRAPHICS/MOODY.PNG</a> ). ....	23
FIGURA 2 DIAGRAMA DE NIKURADSE PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR DE FRICCIÓN. (TOMADO DE <a href="http://www.mp.haw-hamburg.de/pers/gheorghiu/vorlesungen/tts/skript/4/nikuradse.jpg">HTTP://WWW.MP.HAW-HAMBURG.DE/PERS/GHEORGHU/VORLESUNGEN/TTS/SKRIPT/4/NIKURADSE.JPG</a> ). ....	24
FIGURA 3 ESQUEMA DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN. ....	53
FIGURA 4 ESQUEMA DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN - PROPIEDADES FIJAS EN LOS TUBOS. ....	55

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 COEFICIENTES DE FRICCIÓN C PARA ALGUNOS TIPOS DE MATERIALES. ....	17
TABLA 2 VALORES DEL COEFICIENTE CHW DE HAZEN-WILLIAMS.....	34
TABLA 3 PROPIEDADES FIJAS EN LOS NUDOS. ....	52
TABLA 4 PROPIEDADES FIJAS EN LAS TUBERÍAS.....	54
TABLA 5 RESULTADOS SIMULACIÓN N°1. ....	56
TABLA 6 RESULTADOS SIMULACIÓN N°2. ....	58
TABLA 7 RESULTADOS SIMULACIÓN N°3. ....	59

## ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1 ECUACIÓN SIMPLIFICADA DE DARCY-WEISBACH.....	13
ECUACIÓN 2 ECUACIÓN COEFICIENTE MULTIPLICADOR.....	13
ECUACIÓN 3 ECUACIÓN PRANDTL-VON KÁRMÁN.....	14
ECUACIÓN 4 ECUACIÓN DE FLAMANT.....	17
ECUACIÓN 5 ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS.....	18
ECUACIÓN 6 ECUACIÓN DE DARCY – WEISBACH.....	21
ECUACIÓN 7 ECUACIÓN DE COLEBROOK-WHITE.....	22
ECUACIÓN 8 ECUACIÓN PARA EL CALCULO DEL FACTOR DE FRICCIÓN EN FLUJO LAMINAR.....	22
ECUACIÓN 9 ECUACIÓN DE BLASIUS.....	23
ECUACIÓN 10 ECUACIÓN DE PERDIDAS MENORES.....	25
ECUACIÓN 11 ECUACIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA VELOCIDAD.....	25
ECUACIÓN 12 ECUACIÓN DE KOZENY PARA EL CALCULO DEL FACTOR DE FRICCIÓN.....	46
ECUACIÓN 13 ECUACIÓN DE RICHTER PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR DE FRICCIÓN.....	46
ECUACIÓN 14 ECUACIÓN DE CHODER Y DAWSON PARA EL CÁLCULO DE LA VELOCIDAD.....	46
ECUACIÓN 15 ECUACIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA LONGITUD EQUIVALENTE.....	47
ECUACIÓN 16 ECUACIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA LONGITUD ADICIONAL EMPLEANDO DARCY-WEISBACH.....	47
ECUACIÓN 17 ECUACIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA LONGITUD ADICIONAL EMPLEANDO HAZEN-WILLIAMS.....	47
ECUACIÓN 18 ECUACIÓN GENERAL PARA DEFINIR LAS PERDIDAS POR FRICCIÓN.....	49
ECUACIÓN 19 ECUACIÓN GENERAL DE CHÉZY.....	49
ECUACIÓN 20 ECUACIÓN PARA EL CALCULO DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN DE CHÉZY.....	50

---

## ***INTRODUCCIÓN***

---

El diseño de redes de distribución de agua potable (RDAP) desde su inicio se basó en ecuaciones empíricas para facilitar su cálculo, siendo estas en su momento útiles en la aplicación de la ingeniería hidráulica; por mucho tiempo este tipo de ecuaciones han permanecido vigentes y aun en nuestros tiempos muchos diseñadores las siguen empleando como núcleo central del cálculo de las redes.

La aplicación de estas ecuaciones generalmente están muy limitadas a las condiciones empíricas en las cuales fueron determinadas, parametrizando aspectos como la ubicación geográfica, niveles sobre el nivel del mar, temperatura, tipos de material de tuberías y hasta el mismo fluido con el que se realizó el experimento, aspectos que muchas veces no son tenidos en cuenta por los diseñadores que las emplean generando errores que se reflejan en el desempeño integral de la RDAP.

Aun cuando se han desarrollado trabajos en los últimos dos siglos que permiten reevaluar su uso, estas ecuaciones más por costumbre que por su facilidad en la aplicación, se siguen usando para calcular los parámetros y características de la RDAP, con mucho criterio investigadores dedicado al transporte de fluidos y en algunos casos otras ciencias han determinado ecuaciones físicamente basadas que indudablemente acercan el comportamiento de las redes y la iteración fluido – medio de transporte a condiciones mucho más reales.

Entre los objetivos de este trabajo, está el de mostrar la conveniencia de usar las ecuaciones físicamente basadas en vez de las ecuaciones empíricas, aun más si se tiene en cuenta que actualmente existen herramientas informáticas como calculadoras programables y computadoras que inicialmente limitaron su uso, teniéndolas en desventaja ante las ecuaciones empíricas cuyo uso para los cálculos se facilitaba.

El avance de la tecnología, y de métodos matriciales desarrollados durante las décadas de los setenta y ochenta del siglo anterior, han permitido implementar el uso de las ecuaciones físicamente basadas, colocándolas en la vanguardia de los diseños y permitiendo optimizar los mismos aprovechando mejor los recursos naturales, económicos y la materia prima disponible, contribuyendo entre otros aspectos a la conservación del medio ambiente, y a la evolución significativa de la ingeniería hidráulica a nivel mundial.

Si bien el desarrollo de las ecuaciones tema del presente trabajo se ha llevado a cabo en el continente Europeo y en Norte América, es importante analizar como han influenciado esas corrientes de diseño, pues es en Colombia donde se quiere analizar el empleo de las ecuaciones empíricas vs. las ecuaciones físicamente basadas, para al final emitir una opinión sólida basada en la literatura existente de la favorabilidad o no del empleo de las mismas.

---

## ***1 ANTECEDENTES Y OBJETIVOS***

---

### **1.1 ANTECEDENTES**

Las ecuaciones empíricas y físicamente basadas utilizadas por los ingenieros dedicados al diseño redes de distribución de agua potable y de otros fluidos, ha sido desde hace años tema de discusión en lo relacionado a su uso, aplicabilidad y confiabilidad, distanciando opiniones en el gremio de la hidráulica y dividiendo corrientes de la ingeniería que antes de dedicarse a su estudio se enfrascan en opiniones y conceptos en muchas ocasiones obsoletos.

Determinar cuál de las ecuaciones existentes en la actualidad es la más apropiada para diseñar redes de distribución de agua potable en el país, contribuiría seguramente a la optimización de los diseños, reduciendo costos de construcción y operación de los sistemas de acueductos; determinando de esta manera con más exactitud las pérdidas en tuberías, determinación de los diámetros de diseño, incidencia de los distintos materiales disponibles para este propósito en el transporte del fluido, entre otros aspectos fundamentales para la correcta concepción de los diseños.

Consultados los archivos disponibles en la página web de la Universidad de los Andes, y otras páginas de universidades y sitios web dedicados a la academia, son pocos los trabajos relacionados con este tema de tesis, convirtiéndose así en una oportunidad de abrir un camino hacia el análisis crítico de las ecuaciones usadas para el diseño de redes de agua potable.



Sin embargo, el ingeniero civil Freddy Nicolás Angulo Hernández, estudiante del Magister en Ingeniería Civil de la Universidad de los Andes, en 1993 como trabajo de tesis habló del efecto de diferentes tipos de ecuaciones en el diseño final de redes de acueducto, trabajo que se tomará en conjunto con el artículo de la Ingeniera Civil María Elvira Guevara Flujo a presión publicado de la Universidad del Cauca como aportes a el presente trabajo.

Así mismo, y anterior a los dos trabajos mencionados en el párrafo anterior, el Ingeniero civil Juan Saldarriaga en conjunto con el Ingeniero Luis A. Camacho a finales de la década de los ochenta y principios de la década de los noventa escribieron artículos sobre el tema; sin embargo la referencia al respecto será tomada del texto Hidráulica de Tuberías, Abastecimiento de agua, redes, riegos autoría de uno de ellos.

Por ultimo, el doctor M.H Diskin en el año 1960 comparó las ecuaciones de Hazen-Williams y la de Darcy-Weisbach, comparaciones que serán incluidas dentro del presente texto en el trabajo de tesis del ingeniero Angulo.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 *Objetivos Generales*

- Seleccionar y analizar parte de la información que en Colombia existe sobre las ecuaciones usadas para el diseño de redes de distribución de agua potable, y emplearlas en la modelación de una red para comparar los resultados y conceptualizar sobre los mismos.

### 1.2.2 *Objetivos Específicos*

- Recopilar la información existente en la literatura de autores colombianos, en el RAS 2000 y en otras normas existentes relacionada con las ecuaciones de diseño de tuberías.
- Analizar y comparar la información disponible, determinando la justificación de los distintos autores para el empleo de las distintas ecuaciones.
- Aplicar las ecuaciones disponibles en los textos y reglamentos consultados en un sistema modelo de redes de distribución de agua potable.
- Análisis de resultados y conclusiones sobre el empleo de ecuaciones para diseño de tuberías a nivel colombiano.

## ***2 ESTADO DEL ARTE***

---

En el tema estudio sobre el uso de diferentes ecuaciones de diseño de tuberías a nivel colombiano, desde todos los puntos de vista es interesante saber que están pensando los profesionales dedicados a la academia, a la investigación y al diseño de las redes de distribución de agua potable.

Tomando como referencia los autores de textos colombianos relacionados con la hidráulica de redes, se observa que la mayoría de ellos siguen enseñando los métodos de diseño empleando las ecuaciones de Hazen-Williams y en algunos casos la ecuación de Flamant, ecuaciones de origen empírico que si bien arrojan diseños funcionales no son diseños óptimos desde el punto de vista técnico y económico.

Aparte de los textos usados en la mayoría de las instituciones educativas de nivel superior en Colombia, se tomarán como referencia algunas normas de las empresas de acueducto más representativas del país, el Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico del año 2000, y como opinión importante se entrevistarán a profesionales dedicados al diseño de redes de distribución de agua potable; a continuación se analizará el estado del arte en el orden mencionado anteriormente.

### ***2.1 Textos de Autores Colombianos***

Entre los autores se encuentran profesionales de la ingeniería civil y sanitaria reconocidos a nivel nacional e internacional, catedráticos de las mejores universidades del país con basta experiencia en la cátedra de la hidráulica de tuberías.

### ***2.1.1 Acueductos Teoría y Diseño***

Este texto es de autoría de los ingenieros Freddy Hernán Corcho Romero y José Ignacio Duque Serna, ambos profesores de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Medellín. El libro nace con la necesidad de enseñar a los ingenieros civiles y sanitarios los principios básicos para el diseño de acueductos en el año 1993, incluyendo aspectos relacionados desde la captación hasta la distribución domiciliaria.

Sin embargo, su tercera edición del año 2005 no contempla la normatividad actual (RAS 2000), aspecto que fractura la intención de la academia de preparar a los estudiantes y profesionales con conceptos vanguardistas que mejoren su competitividad y aporte al desarrollo del país.

El tema de interés en este trabajo es abordado por los autores en el Capítulo 7 del texto *Redes de Distribución*, en el cual el autor deja ver su preferencia por el uso de la ecuación de Darcy-Weisbach, aunque menciona la de Hazen -Williams hace claridad que esta ecuación no arroja buenos resultados para diámetros inferiores a 4 pulgadas estableciendo esta condición como única restricción de validez en dicho capítulo, por esto usa la primera para el cálculo de las pérdidas por fricción en conjunto con la ecuación de Prandtl-Von Kármán.

Se mencionan los métodos de cálculo balance de cabezas, balance de flujos, Newton-Raphson, Teoría Lineal y superficie de energía usando las ecuaciones anteriores, intercalando el uso de

la ecuación de Hazen-Willian y Darcy-Weisbach en los ejemplos para cada uno de los métodos.

Con el propósito de facilitar los cálculos, los autores escriben la ecuación de Darcy-Weisbach de la siguiente manera:

$$h_f = KLQ^2$$

**Ecuación 1 Ecuación simplificada de Darcy-Weisbach.**

en donde:

$h_f$  : Pérdidas por fricción en m.

$K$  : Coeficiente multiplicador.

$L$  : Longitud de la tubería en m.

$Q$  : Caudal de diseño en m<sup>3</sup>/s.

Para este caso, el valor de K se obtiene de la siguiente manera:

$$K = \frac{8f}{\pi^2 g D^5}$$

**Ecuación 2 Ecuación coeficiente multiplicador.**

en donde:

$K$  : Coeficiente multiplicador.

$f$  : Coeficiente de fricción de Darcy.

$D$  : Diámetro en m.

$g$  : Aceleración de la gravedad en m/s<sup>2</sup>.

$\pi$  : Constante 3.1416.

Los valores de  $K$  son calculados previamente y consignados en tablas para la facilidad del lector; para calcular el valor de  $f$ , los autores emplean la ecuación de Prandtl-Von Kármán, ecuación válida para flujos turbulentos hidráulicamente rugosos aunque en la actualidad la mayoría de los materiales por la baja rugosidad de sus paredes generan flujos turbulentos hidráulicamente lisos; sin embargo, se menciona en el texto que se emplea esta ecuación debido a que generalmente los acueductos se diseñan con esta suposición de flujo turbulento hidráulicamente rugosos, la ecuación de Prandtl-Von Kármán es la siguiente:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 + 2 \log_{10} \left( \frac{d}{k_s} \right)$$

### **Ecuación 3 Ecuación Prandtl-Von Kármán**

en donde:

$f$  : Coeficiente de fricción de Darcy.

$d$  : Diámetro en m.

$k_s$  : Rugosidad absoluta pared interna de la tubería en m.

Esta ecuación puede escribirse de forma explícita para  $f$ , aspecto que facilita su uso; por su parte, el cálculo del caudal es previamente establecido para cada nudo de acuerdo con la demanda y con este dato se inicia a calcular las pérdidas por fricción hasta que se satisfagan los requerimientos de presión en cada uno de los nudos del sistema; este cálculo se puede adelantar usando cualquiera de los métodos empleados por los autores y que fueron mencionados anteriormente.

### ***2.1.2 Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados***

Texto escrito por el Ingeniero Ricardo Alfredo López Cualla, profesor titular del Programa de Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, institución reconocida a nivel nacional en la enseñanza de las diferentes ramas de la ingeniería.

El texto resume el diseño de acueductos y alcantarillados en todas sus etapas y procesos, interesante desde el punto de vista de la ingeniería práctica, convirtiéndose en una herramienta didáctica y explícita para la concepción de la distribución y recolección de agua en poblaciones y ciudades de Colombia.

La segunda edición es la analizada para los propósitos del presente trabajo, publicada en el mes de julio de 2003 y con reimpressiones sucesivas anuales hasta el año 2010; el tema de análisis es tocado por este autor en el Capítulo 13 del texto *Red de Distribución*, en el cual habla del cálculo de las redes empleando el Método de Hardy Cross, Distribución de los caudales y el Método de longitudes equivalentes, usando para todos los casos exclusivamente la ecuación de Hazen-Williams.

El autor no menciona en sus métodos la ecuación de Darcy-Weisbach, aun cuando es una edición reciente. Menciona el Método del Gradiente como un método nuevo; sin embargo hace claridad que su texto está enfocado a los métodos de cálculos manuales mencionados en el párrafo anterior, por lo que no se profundizará en el análisis del mismo.

### ***2.1.3 Instalaciones hidrosanitarias y de gas para edificaciones***

Se ha convertido en una herramienta indispensable para los profesionales de la Ingeniería Civil y Sanitaria que se dedican al diseño de las instalaciones hidrosanitarias internas en edificaciones; el autor es el ingeniero civil Rafael Pérez Carmona quien hasta hace poco fue Decano de Ingeniería de la Universidad Católica de Colombia.

Es un texto práctico, didáctico y enfocado a realizar diseños sencillos basados en tablas de pérdidas de energía para distintos diámetros y caudales; la edición analizada es la sexta, publicada en el año 2010, aunque es la edición más reciente de los cuatro textos usados como referencias aun sus criterios de diseño están basados en la ecuación de Hazen-Williams.

Este texto también emplea en sus criterios de diseño la ecuación de Flamant como herramienta para el cálculo de pérdidas por fricción en tuberías; el autor, al igual que el anterior, no menciona en su totalidad las restricciones de la ecuación de Hazen-Williams, aspecto crítico sobre todo para este texto que en su mayoría es empleado para diseñar redes de distribución internas para edificaciones cuyos diámetros están comprendidos entre  $\frac{1}{2}$ " y 3".

El autor en el inicio del Capítulo 3 *Cálculo de pérdidas en tuberías y accesorios*, indica como se mencionó en los párrafos anteriores, que emplea ecuaciones desarrolladas empíricamente, indicando que la ecuación de Flamant ha sido la más adaptada para tuberías de pequeños diámetros (entre media pulgada y dos pulgadas), para materiales de acero, hierro galvanizado y Policloruro de Vinilo (PVC).



La ecuación de Flamant se expresa de la siguiente forma:

$$j = \frac{6.1CQ^{1.75}}{D^{4.75}}$$

**Ecuación 4 Ecuación de Flamant.**

en donde:

$j$  : Pérdida de carga en m/m.

$C$  : Coeficiente de fricción.

$Q$  : Caudal en m<sup>3</sup>/s.

$D$  : Diámetro en m.

Generalmente esta ecuación por sus limitaciones se emplea para el diseño de redes de distribución de agua fría en edificios, limitando la velocidad del agua dentro del rango de los 0.6 hasta 2.0 m/s hasta un diámetro máximo de 3"; para diámetros mayores se pueden usar velocidades iguales a los 2.5 m/s. El coeficiente de fricción  $C$  se toma de acuerdo con la rugosidad interna de la tubería teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

**Tabla 1 Coeficientes de fricción  $C$  para algunos tipos de materiales.**

<b>Coeficiente de fricción</b>	$C$
Hierro galvanizado y acerado	100
Hierro fundido	120
Asbesto cemento	130
Cobre y fibra de vidrio	140
Policloruro de Vinilo (PVC)	150

Otra fórmula empleada por el autor es la de Hazen-Williams, recomendada en el texto para diámetros superiores a 2" y para temperatura ambiente igual a 15°C, o para aguas a diferentes

temperaturas siempre y cuando no se altere significativamente la viscosidad, la ecuación se expresa así:

$$Q = 0.28CD^{2.63}j^{0.54}$$

**Ecuación 5 Ecuación de Hazen-Williams.**

en donde:

$Q$  : Caudal en m<sup>3</sup>/s.

$C$  : Coeficiente de fricción.

$D$  : Diámetro de la tubería en m.

$j$  : pérdida de carga en m/m.

Con lo anterior, el autor en el Capítulo cuatro *Redes de Distribución* de su texto, realiza los cálculos de los diámetros de las redes de distribución de agua potable en edificios teniendo en cuenta las unidades de consumo de los aparatos a abastecer lo cual le proporciona el caudal; con esto escoge un diámetro y verifica con la ecuación básica  $Q=VA$  que la velocidad este entre 0.6 y 2.0 m/s, si el resultado de la velocidad está dentro de los rangos mencionados el diámetro cumple y se decide su empleo teniendo en cuenta las pérdidas por fricción registradas en tablas para cada diámetro y caudal de consumo como se explicará seguidamente.

Seguido a lo anterior se determinan las pérdidas en metros/metros (m/m) empleando las ecuaciones de Flamant o de Hazen-Williams las cuales fueron descritas anteriormente, pudiendo así determinar las alturas a vencer multiplicando el valor de la pérdida (m/m) obtenido por la longitud total del tramo analizado en el sistema de distribución bien sea por

gravidad o por presión, definiendo así la cabeza necesaria para garantizar la presión y el caudal requerido. Para facilitar estos cálculos el autor presenta en su texto tablas que proporcionan el valor de las pérdidas por fricción o de carga ingresando con los datos de unidades de consumo, diámetro y coeficiente de fricción  $C$  de acuerdo con cada material.

Para las pérdidas por accesorios (tees, codos, reducciones, válvulas, etc.), que previo al cálculo de la potencia de la bomba o altura del tanque son sumadas a las mencionadas en el párrafo anterior, el autor emplea el método de longitud equivalente, el cual consiste en asignar a un accesorio una longitud de tubería recta equivalente, sumando este dato a la longitud real de los tramos rectos para definir las pérdidas totales.

En general el autor no justifica en su texto el uso de las ecuaciones empíricas; es presumible que su uso radica en la simplicidad y facilidad del cálculo de las redes.

#### ***2.1.4 Hidráulica de Tuberías, Abastecimiento de agua, redes, riego***

Texto del ingeniero civil Juan G. Saldarriaga Valderrama, profesor titular del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de los Andes quien publicó en el año 2007 el texto en mención; el trabajo es totalmente novedoso y a diferencia de los anteriores se caracteriza por llevar al estudiante al empleo de las herramientas informáticas para el diseño de redes de distribución.

La tendencia del texto está enfocada al empleo de las ecuaciones racionales y físicamente basadas, principio que el autor defiende argumentando que son ecuaciones confiables y con gran precisión, con las que se obtienen datos más cercanos a la realidad optimizando los recursos económicos para la construcción y operación de redes, aduciendo además que no existe excusa con los medios computacionales existentes en la actualidad para limitar su uso.

En el Capítulo 3 *Ecuaciones empíricas para el diseño de tuberías* menciona las ecuaciones de Hazen-Williams, Wood, Barr, Swamme-Jain y Moody como alternativas para el cálculo de las pérdidas por fricción, dejando a opción del diseñador su empleo para la definición de las redes; sin embargo recalca las restricciones para su empleo. Para efectos de que más adelante se puedan realizar comparaciones, los rangos de validez para la ecuación de Hazen-Williams son los siguientes:

1. El fluido debe ser agua a temperaturas normales.
2. El diámetro debe ser superior o igual a 75 mm o 3 pulgadas.
3. La velocidad en las tuberías debe ser inferior a 3 m/s.

Sin duda alguna, es un texto orientado a las nuevas tecnologías y herramientas usadas para el cálculo de redes; muestra los métodos más importantes para el diseño haciendo énfasis en el Método del Gradiente cuyas características basadas en el álgebra matricial y apoyadas en las herramientas informáticas facilitan y optimizan el cálculo de las redes de distribución.

Siendo el texto más completo a nivel nacional para el diseño de redes de distribución, y en concordancia con lo anterior el autor propone el empleo de la ecuación de Darcy-Weisbach o ecuación de resistencia fluida, desarrollada a mediados del siglo XIX para el cálculo de las pérdidas por fricción, la cual se expresa así:

$$h_f = f \frac{l v^2}{d 2g}$$

**Ecuación 6 Ecuación de Darcy – Weisbach.**

en donde:

$h_f$  : Pérdidas por fricción en m.

$f$  : Coeficiente de fricción de Darcy.

$l$  : Longitud de la tubería en m.

$d$  : Diámetro en m.

$g$  : Aceleración de la gravedad en  $m/s^2$ .

$v$  : Velocidad del fluido en m/s.

El desarrollo de esta ecuación tuvo sus bases en el análisis dimensional, lo que la hace una ecuación dimensionalmente correcta en comparación con la ecuación de Hazen-Williams, siendo desde este punto de vista una ventaja más para decidir sobre su empleo.

Las incógnitas para solucionar la ecuación y la disponibilidad de variables dependerán del tipo de problema que se requiera resolver, teniendo en cuenta que el autor plantea cuatro casos representativos de acuerdo con los problemas para el diseño que se presentan en las redes de distribución; entre ellos se tienen la comprobación de diseño, cálculo de potencia requerida, diseño de tuberías y calibración de tubería.

En la mayoría de los casos se define previamente la longitud de la tubería, rugosidad absoluta, la aceleración de la gravedad, caudales requeridos, etc., lo que facilita su empleo.

El factor de fricción  $f$  se puede obtener empleando la ecuación de Colebrook-White siendo válida para cualquier régimen de flujo turbulento, aspecto que sumado al de ser una ecuación físicamente basada la hacen merecedora de su empleo para el cálculo de las redes de distribución; la ecuación se expresa así:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

**Ecuación 7 Ecuación de Colebrook-White.**

en donde:

$f$  : Coeficiente de fricción de Darcy.

$k_s$  : Rugosidad absoluta pared interna de la tubería en m.

$d$  : Diámetro en m.

$Re$  : Número de Reynolds.

Sin embargo se mencionan otras ecuaciones para su cálculo, condicionando su uso a las condiciones particulares del régimen de flujo, entre las cuales se tienen las siguientes:

Para el caso de flujos laminares, Weisbach se basó en el trabajo realizado por Hagen-Poiseuille obteniendo la siguiente ecuación para el cálculo de  $f$ :

$$f = \frac{64}{Re}$$

**Ecuación 8 Ecuación para el calculo del factor de fricción en flujo laminar.**

Para el caso de flujos turbulentos hidráulicamente lisos con números de Reynolds comprendidos entre 5.000 y 100.000 Blasius, alumno de Prandtl definió la ecuación:

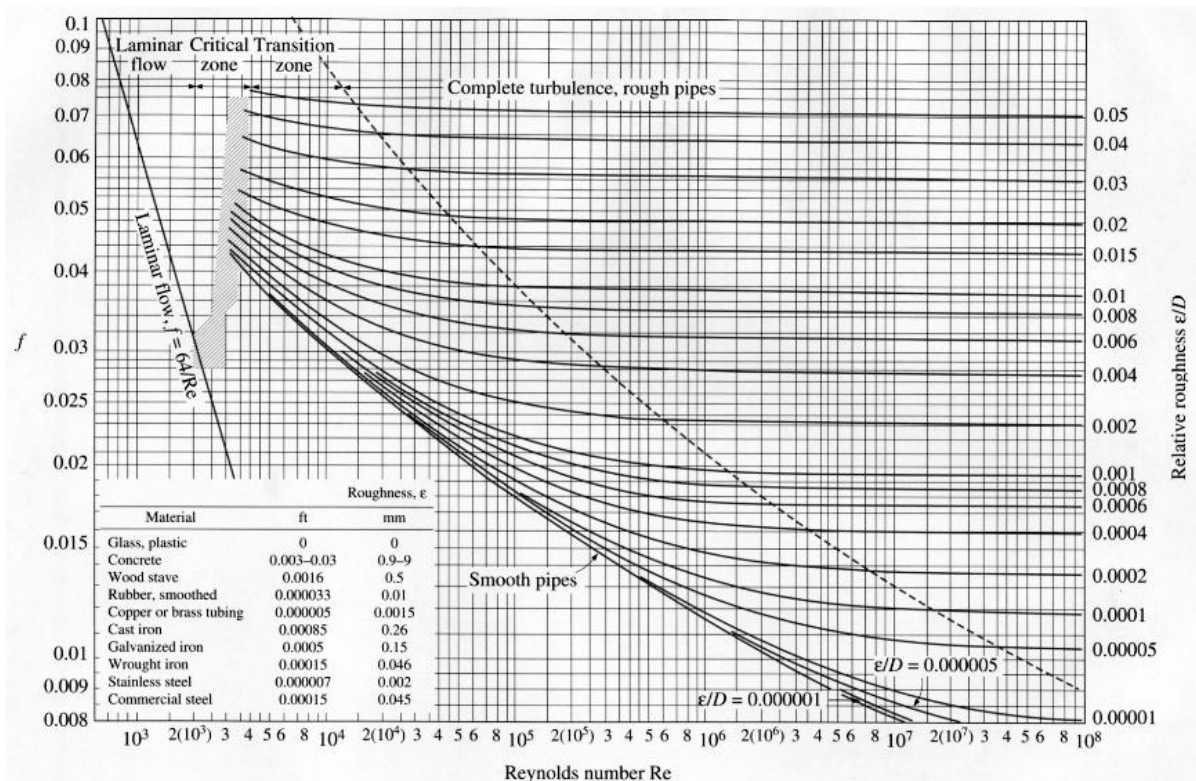
$$f = \frac{0.316}{Re^{0.25}}$$

**Ecuación 9 Ecuación de Blasius.**

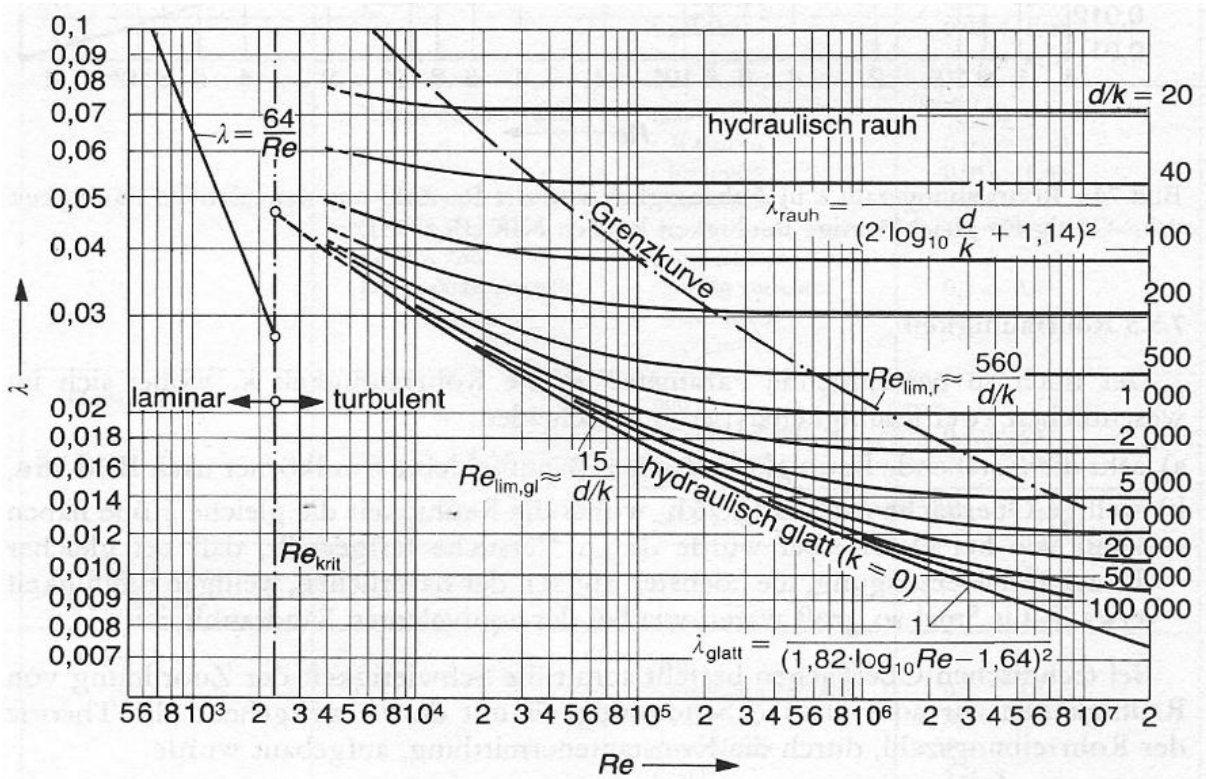
Otras ecuaciones serán mencionadas en otros apartes del documento; en conjunto con las anteriores son las más conocidas para el cálculo del factor de fricción. Sin embargo, cuando se inició el desarrollo de estas ecuaciones no existían herramientas computacionales que facilitaran su empleo, sobre todo para la ecuación de Colebrook-White; por lo anterior ingenieros como Nikuradse y Moody desarrollaron diagramas para facilitar su cálculo.

**Figura 1 Diagrama de Moody para el cálculo del factor de fricción. (Tomado de**

**<http://people.msoe.edu/~tritt/be382/graphics/Moody.png>).**



**Figura 2 Diagrama de Nikuradse para el cálculo del factor de fricción. (Tomado de <http://www.mp.haw-hamburg.de/pers/Gheorghiu/Vorlesungen/TTS/Skript/4/Nikuradse.jpg>).**



Por su parte, el valor de  $K_s$  depende del material seleccionado para la tubería (PEAD, PVC, HG, etc.), los valores de  $d$  dependen de cual de los cuatro casos se requiere resolver, pues puede ser suministrado o puede ser colocado como un valor semilla en un algoritmo hasta llegar al diámetro que cumpla con los requerimientos del diseño (generalmente el caudal); lo mismo sucede con el Número de Reynolds pudiendo de esta manera calcular el valor de  $f$  a través de un proceso iterativo.

Para obtener las pérdidas producidas por los accesorios el autor basa su cálculo en la siguiente ecuación así:



$$h_{mi} = k_i \frac{v^2}{2g}$$

**Ecuación 10 Ecuación de pérdidas menores.**

en donde:

$h_{mi}$  : Pérdidas por fricción en el accesorio  $i$  en m.

$k_i$  : Coeficiente de perdidas del accesorio  $i$ .

$v$  : Velocidad del fluido en m/s.

$g$  : Aceleración de la gravedad en  $m/s^2$ .

La cual tiene en cuenta la energía por efectos de la altura de velocidad en el accesorio multiplicada por un coeficiente de pérdidas  $k$  obtenido generalmente por el fabricante de los accesorios en el laboratorio y difundido por el mismo en fichas técnicas.

Para dar complemento a las ecuaciones fundamentales para el diseño de redes de distribución, el autor plantea la ecuación de velocidad, basada en la ecuación de Colebrook-White y en la ecuación de Darcy-Weisbach la cual se expresa así:

$$v = \frac{-2\sqrt{2gdh_f}}{\sqrt{l}} \log_{10} \left( \frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51\nu\sqrt{l}}{d\sqrt{2gdh_f}} \right)$$

**Ecuación 11 Ecuación para el cálculo de la velocidad.**

en donde:

$h_f$  : Pérdidas por fricción en m.

$f$  : Coeficiente de fricción de Darcy.

$l$  : Longitud de la tubería en m.

- $d$  : Diámetro en m.
- $g$  : Aceleración de la gravedad en  $m/s^2$ .
- $v$  : Velocidad del fluido en m/s.
- $k_s$  : Rugosidad absoluta pared interna de la tubería en m.
- $\vartheta$  : Viscosidad cinemática del fluido en  $m^2/s$ .

Siendo esta ecuación explícita para la velocidad, se facilita mucho su empleo; sin embargo requiere de un algoritmo computacional para el diseño de redes, toda vez que los datos del diámetro y pérdidas por fricción son calculados con valores distintos hasta satisfacer las condiciones del diseño en lo referente al caudal requerido para el caso de diseño de tuberías.

Determinar en este documento la forma del empleo de las ecuaciones mencionadas para la solución de los problemas de comprobación de diseño, cálculo de potencia y calibración de tuberías no es el objeto del mismo; sin embargo el lector se puede remitir al texto en mención exactamente al Capítulo 2 para su análisis y comprensión y para identificar el empleo de las ecuaciones mencionadas anteriormente. Ahí encontrará algoritmos computacionales realizados en hojas de cálculo de Excel para cada caso si se quiere conocer de tuberías simples, y en los capítulos siguientes para tuberías en serie, paralelo, redes abiertas, redes cerradas, etc.

Sin embargo para el caso de diseño de redes de distribución cerradas el autor escribe en su texto los métodos de Hardy-Cross con corrección de caudales en los circuitos y alturas en los nodos, método de Newton-Raphson, método de la Teoría Lineal y el método del Gradiente

Hidráulico considerado un método estructurado en las ecuaciones físicamente basadas, ecuación de conservación de la masa, ecuación de conservación de momentum, métodos del algebra lineal y en el empleo de herramientas computacionales de vanguardia, convirtiéndolo así en el más ventajoso desde el punto del tiempo, calidad y fiabilidad de los resultados.

El empleo de estas ecuaciones a diferencias de las de Flamant y de Hazen-Williams requiere de herramientas computacionales con cálculos iterativos, herramientas que en la actualidad no presentan ningún grado de dificultad en su disponibilidad y uso, por lo que se invita al lector a su familiarización y empleo en sus nuevos diseños.

### ***2.1.5 Principales avances y similitud***

Antes que principales avances, y tomando como excepción los textos *Hidráulica de Tuberías, Abastecimiento de agua, Redes, Riegos y Acueductos Teoría y Diseño*, se evidencia con preocupación como autores colombianos, quienes enseñan a través de la catedra en las universidades en las que laboran las políticas para el diseño, lo hacen con ecuaciones empíricas que seguramente arrojan datos erróneos en un gran porcentaje de su uso.

Existe una gran resistencia por usar las ecuaciones físicamente basadas, entendiendo como una posible explicación que estos autores han hecho sus especializaciones y maestrías en Estados Unidos, país donde la ecuación de Hazen-Williams tiene gran reconocimiento; caso contrario sucede con el ingeniero Saldarriaga quien adelantó sus estudios de maestría en el continente Europeo donde nació la ecuación de Darcy-Weisbach.

Se convierte así el trabajo realizado por el ingeniero Saldarriaga como el único aporte significativo para tener en cuenta como avance en el diseño de redes por la innovación en el uso de ecuaciones físicamente basadas, teniendo similitud con lo escrito en el texto de los profesores Fredy Corcho y José Duque.

Otro avance significativo se encuentra en el desarrollo del programa REDES del Ingeniero Saldarriaga, el cual permite diseñar propiamente redes de distribución lo que optimiza indudablemente los costos de construcción y operación; así mismo, la empresa PAVCO ha invertido recursos en la caracterización de sus tuberías, obteniendo datos de las mismas que en conjunto con estos nuevos programas contribuyen al desarrollo de proyectos con gran responsabilidad social.

La similitud de lo averiguado a la fecha con el tema de la tesis es acorde, investigando sobre la bibliografía se observa lo importante de profundizar en este tema para dejar el inicio de un trabajo cuya profundidad será concientizar a los futuros diseñadores del empleo de ecuaciones físicamente basadas para el diseño de tuberías.

## ***2.2 Normatividad existente***

Aparte de lo que piensas los autores de los textos relacionados con el diseño de redes de distribución, es igualmente importante o más aun, lo establecido en las normas de diseño establecidas por el Gobierno Nacional y por las empresas prestadoras de servicios públicos,

pues es en últimas a lo que están obligados los profesionales dedicados al diseño de los sistemas de distribución de agua potable en el país.

Para efectos de este trabajo se citaran las más representativas, entre ellas el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS 2000, Normas SISTEC de la Empresa de Acueductos y Alcantarillados de Bogotá y las Normas de Diseño de Acueductos de las Empresas Públicas de Medellín.

### ***2.2.1 Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS 2000.***

Es un documento técnico-normativo expedido bajo la autorización del entonces Ministerio de Desarrollo Económico de la República de Colombia en el año 2000, con el propósito de señalar a nivel nacional los requisitos que deben cumplir las obras, procedimientos y equipos que sean empleados en la prestación de servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo.

Para efectos de este trabajo, se tomará como referencia la Sección II - Título B – Sistemas de Acueducto, y por su relación directa con el tema de la tesis los Capítulos B.6 Aducciones y Conducciones y el Capítulo B.7 - Redes de distribución, en los cuales se observara los requisitos de la norma con respecto al empleo de ecuaciones para el diseño de conductos a presión.

Los artículos incluidos en la norma que se relacionan directamente con el tema son los que se relacionan a continuación:

B.6.4.4 Conductos a presión para aducciones y conducciones.

B.6.4.4.3 Cálculo Hidráulico.

B.6.4.4.4 Ecuación universal para conductos a presión.

B.6.4.5 Ecuación para el cálculo de pérdidas menores.

B.7.4.9.2 Calculo hidráulico de la red de distribución.

B.7.4.9.3 Ecuaciones para las pérdidas de fricción en tuberías.

En general esta norma menciona inicialmente que se de deben emplear las ecuaciones de Darcy-Weisbach en conjunto con la ecuación de Colebrook-White para el cálculo de las pérdidas por fricción en tuberías y para la determinación del factor de fricción de Darcy respectivamente; sin embargo, y siendo una norma reciente aun permite el empleo de la ecuación de Hazen-Williams haciendo énfasis en que se deben tener en cuenta sus condiciones y rangos de validez.

Con respecto a las pérdidas producidas por los accesorios, la norma indica tácitamente en su Artículo B.6.4.5 que el diseñador debe emplear la Ecuación 10 descrita en el presente texto para el caso de las aducciones y conducciones, indicando que se debe justificar el valor de los coeficientes de pérdidas para cada uno de los accesorios usados de acuerdo con la bibliografía adoptada por el diseñador, la cual por supuesto debe estar relacionada con el tipo de materiales empleados en el diseño.

En el caso de las redes de distribución para el cálculo de las pérdidas menores, adicional al uso de la Ecuación 10 descrita en el presente texto, se permite el empleo del método de las longitudes equivalentes siempre y cuando el programa empleado para el cálculo permita la entrada de la longitud de cada tubería de la red equivalente como uno de los datos e entrada del programa.

Aunque hay una redacción que le indica al lector de la norma que se incline por el empleo de la ecuación de Darcy-Weisbach, la norma no prohíbe el empleo de la ecuación de Hazen-Williams, permitiendo así que por desconocimiento de muchos diseñadores o en la mayoría de los casos por una incidencia más cultural que profesional, se inclinen por su uso, produciendo diseños sobrestimados en sus pérdidas de energía y en los diámetros de las tuberías, situaciones que se reflejan directamente aumentando los costos de construcción y de operación del sistema.

Para el cálculo hidráulico de la red de distribución la norma permite el uso del Método de la Teoría Lineal, Método del Gradiente, Método de Hardy Cross, Método de las Longitudes Equivalentes, o cualquier otro método de cálculo similar, siempre que previo a su uso sea aprobado por la empresa encargada de la prestación final del servicio, dejando a criterio de sus profesionales la calidad de los resultados que con cada método se puedan obtener; sin embargo se toman tal cual de la norma las especificaciones que para su uso se deben tener en cuenta así:

1. Puede utilizarse software especializado para el cálculo hidráulico de la red, los cuales son programas comerciales ampliamente conocidos y que están basados en los métodos anteriormente mencionados.
2. En caso de que para el diseño de la red de distribución se opte por un programa basado en métodos diferentes, éste debe ser aprobado por la empresa prestadora del servicio.
3. De todas formas, el método de cálculo o el programa utilizado para el análisis hidráulico de la red debe permitir el análisis de líneas abiertas, en conjunto con el de las redes cerradas.
4. El método o programa de computador, debe permitir el cálculo optimizado de la red de distribución. Esto quiere decir que los diámetros resultantes para cada una de las tuberías que conforman la red de distribución deben estar optimizados desde el punto de vista de los costos globales de la red.
5. Los errores de cierre para el cálculo hidráulico de la red serán como máximo 0.10 mca; en el caso de que el criterio de convergencia sea la cabeza piezométrica en los nodos de la red, o 1.0 l/s en el caso de que el criterio de convergencia sea el cumplimiento de la ecuación de continuidad en cada uno de los nodos de la red.
6. Para el cálculo hidráulico de la red, el programa o método utilizado debe hacer uso de las ecuaciones de pérdida de altura de Darcy-Weisbach o de Hazen-Williams.

Si se tienen en cuenta las consideraciones anteriores, es obvio que los métodos iniciales como el de Hardy Cross o el Método de la Teoría Lineal le resultaran supremamente engorrosos para el diseñador, por lo que resultaría más fácil el Método del Gradiente Hidráulico usado por programas como EPANET, el cual puede ser adquirido de forma gratuita.



Siendo esta la norma por la cual deben regirse las empresas, consultores y contratistas dedicados a la prestación del servicio de acueducto, puede considerarse amplia en relación a los criterios del diseño hidráulico, pudiendo permitir como se dijo anteriormente que se incurra en errores que se reflejen en la parte económica y por ende en las finanzas de los usuarios, aspecto por el cual sería importante revisarla para hacer más énfasis en el uso de la ecuación de Darcy-Weisbach y en el desuso de la ecuación de Hazen-Williams con el único propósito de generar más responsabilidad social en los actores del escenario de los acueductos a nivel nacional.

### ***2.2.2 Normas de Diseño de Sistemas de Acueducto de las Empresas Públicas de Medellín.***

Norma cuyo propósito es fijar los criterios para el diseño de las redes de distribución de agua potable que sean planificados y diseñados por contratistas o empleados de las Empresas Públicas de Medellín, o para ser empleada por los ingenieros de mantenimiento, constructores y operadores encargados del abastecimiento de agua potable en los municipios operados por la misma empresa, fijando los requisitos y valores mínimos, valores específicos, metodologías y procedimientos generales que deben tenerse en cuenta en los procesos involucrados en el diseño de sistemas de acueducto.

Esta basada en sus aspectos generales en el RAS 2000, específicamente en los Títulos A “Aspectos Generales de los Sistemas de Agua Potable y Saneamiento Básico” y en el Título B “Sistemas de Acueducto”. Para efectos del tema de tesis, lo relacionado a la misma se

encuentra en el Capítulo 4 “Conducciones” y en el Capítulo 5 “Redes de Distribución” de los cuales se hablará a continuación.

Para el caso de las Conducciones se encuentra la referencia en el Numeral 4.5 Diseño de las Conducciones – 4.5.3.1 Cálculo de las pérdidas por fricción, en el cual la norma indica que el diseñador debe emplear la ecuación de Darcy-Weisbach en conjunto con la ecuación de Colebrook-White para el cálculo de las pérdidas por fricción en las tuberías; sin embargo, y adicional a lo anterior, la norma permite en su Numeral 4.5.3.3 Cálculo hidráulico con la ecuación de Hazen-Williams; el empleo de esta ecuación para el cálculo del diámetro de las tuberías y perdidas por fricción teniendo en cuenta los siguientes rangos de validez:

1. El diámetro nominal no puede ser menor que 100 mm o 4 pulgadas.
2. La velocidad no puede ser mayor que 3 m/s.
3. El flujo no puede ser laminar.

Para el empleo de la ecuación la norma establece los siguientes valores para el coeficiente de Hazen-Williams de acuerdo con la siguiente tabla:

**Tabla 2 Valores del Coeficiente CHW de Hazen-Williams.**

<b>Material</b>	<b>Condición</b>	<b>Diámetro (pulg.)</b>	<b>CHW</b>
Acero soldado	Constante	$d \geq 12$	120
		$8 \leq d \leq 10$	119
		$4 \leq d \leq 6$	118

Acero bridado	Constante	$d \geq 24$	113
		$12 \leq d \leq 20$	111
		$4 \leq d \leq 10$	107
Concreto	Formaleta de acero	Todos	140
	Formaleta de madera	Todos	120
	Centrifugado	Todos	135
PVC	Constante	Todos	150
Hierro Dúctil	Con revestimiento interior de cemento		140
			150
Polietileno			150
GRP			150

Una observación importante es que se debe tener en cuenta la sensibilidad de los datos obtenidos; para los casos en que los resultados se encuentren sobre los límites es necesario adelantar los cálculos con la ecuación de Colebrook-White.

Con respecto al cálculo de las pérdidas producidas por los accesorios en las conducciones, la norma indica que se debe usar la Ecuación 10 escrita en el presente texto, dejando solo para casos de estudios, diagnósticos y cálculos preliminares el empleo del método de longitudes equivalentes sin que pueda usarse para el cálculo definitivo de la red.

Referente al cálculo de las redes de distribución se sugiere al igual que para las conducciones la ecuación de Darcy-Weisbach en conjunto con la ecuación de Colebrook-White, se nota con

importancia que para emplear en este caso la ecuación de Hazen-Williams aparte de tener en cuenta las condiciones y parámetros de validez se debe solicitar la aprobación de las Empresas Públicas de Medellín para su uso, teniendo en cuenta sobre todo la precisión de los datos obtenidos para periodo extendido.

Para las pérdidas menores producidas por los accesorios se debe emplear la Ecuación 10 escrita en el presente texto; en el caso de las redes de distribución no se considera emplear la metodología de la longitud equivalente para los cálculos y estudios preliminares.

Para el cálculo hidráulico de la red la norma es más estricta con los diseñadores al indicar que se debe incluir una modelación matemática que permita entender la hidráulica para cualquier condición de operación o cualquier condición de emergencia; así mismo, debe ser posible analizar la red en condiciones de flujo permanente o en un periodo extendido teniendo en cuenta las variaciones del flujo durante los distintos días de la semana y a diferentes horarios; igualmente, se exige que el programa empleado use en su algoritmo las ecuaciones de Darcy-Weisbach en conjunto con la ecuación de Colebrook-White.

Se considera una norma más estricta entendiendo que para analizar lo requerido por ejemplo con el Método de Hardy Cross sería prácticamente imposible, pues se tendrían tantos diseños de la red como tantas situaciones diferentes en el tiempo y bajo condiciones diferentes se requieran simular, convirtiéndose el Método del Gradiente Hidráulico como el más apropiado para el análisis de las redes bajo el requerimiento de las Empresas Públicas de Medellín.

### ***2.2.3 Sistema de Información de Normalización y Especificaciones Técnicas***

#### ***“SISTEC” Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá***

La Empresa de Acueductos y Alcantarillados de Bogotá, estableció para sus procesos de planeación, construcción y puesta en marcha de sistemas de acueducto la norma SISTEC desde el año 2000, la cual incluye todos los procesos que se involucran en la prestación del servicio de agua potable.

Lo referente al diseño de redes de distribución se encuentra en las siguientes normas específicas dentro del Capítulo de diseño así:

NS-033 Criterios para diseño de red matriz.

NS-034 Criterios para diseños de conducciones y líneas expresas.

NS-036 Criterios para diseño de red de acueducto secundaria y menor distribución.

En general en cada una de las normas particulares mencionadas anteriormente, se exige el empleo de la ecuación de Darcy-Weisbach en combinación con la ecuación de Colebrook-White; así mismo, se permite el empleo de la ecuación de Hazen-Williams teniendo en cuenta sus rangos de validez y grados de exactitud, para la norma los rangos de validez son los siguientes:

1. La velocidad máxima no debe ser mayor a 3 m/s.
2. El diámetro debe ser superior o igual a 2 pulgadas.

No se profundiza en el análisis de esta norma debido a que en lo relacionado a las redes de distribución exige lo mismo que el RAS 2000, remitiendo al lector en cada uno de sus numerales a lo indicado por la norma del nivel nacional.

### ***2.3 Profesionales de la Ingeniería dedicados a la Hidráulica de Redes de Distribución.***

A través de entrevistas realizadas a profesionales dedicados a la consultoría relacionada con las redes de distribución, y a la lectura de documentos de otros profesionales dedicados a la investigación y docencia, se buscó conocer que opinión tiene cada uno de ellos en lo concerniente al uso de las ecuaciones de diseño de redes de distribución las cuales se muestran a continuación.

#### ***2.3.1 Ingeniero Civil Oscar Julián Cortés Rivero***

Egresado de la Universidad de los Andes en el año 2007, realizó el Master en Ingeniería Civil con énfasis en Sistemas de la misma universidad; en la actualidad se desempeña como Ingeniero de Diseño de redes de distribución en la empresa PAVCO-Mexichem, área en la que acumula un poco más de cinco años de experiencia específica.

Para el diseño de las redes de distribución emplea exclusivamente la ecuación de Darcy-Weisbach en conjunto con la ecuación de Colebrook-White, con la cual ha obtenido resultados favorables con costos razonables en los diseños que ha realizado; aparte de él, el equipo de trabajo de PAVCO trabaja con la misma ecuación, incluso ha podido constatar entre sus

contactos internacionales con la empresa WAVIN productora de tubería en PVC en Europa, que la totalidad de sus ingenieros de diseño emplean la misma ecuación.

No comparte el uso de la ecuación de Hazen-Williams, pues aparte de sus limitaciones de velocidades, diámetros y temperaturas, no permite diferenciar entre algunos materiales, pues para el caso del PVC y del Polietileno la metodología establece el mismo valor del coeficiente de fricción de Hazen-Williams (CHW), aspecto que carece de validez. Así mismo, en su experiencia de ensayos y pruebas realizadas, ha evidenciado que con la ecuación de Hazen-Williams entre más rugoso es el material menos pérdidas por fricción obtiene en comparación con un material menos rugoso.

Sin embargo, en su recorrido profesional no ha evidenciado que por el uso de la ecuación de Hazen-Williams halla fallado alguna red; entre sus preocupaciones ve la falta de actualización en los profesionales que se dedican al diseño de redes, quienes en algunos casos emplean ecuaciones empíricas para el cálculo de las pérdidas y en otros casos aun con gran diversidad de programas emplean hojas de Excel para la modelación hidráulica.

El programa de diseño que emplea para la modelación hidráulica de las redes es EPANET, del cual habla como un programa sencillo, con interfaz limitada pero suficiente y muy preciso en el momento de arrojar los resultados, mencionando además que no tiene limitación en el número de tubos lo que constituye en la mayoría de las veces las desventajas de los otros programas.

Considera que las normas existentes deben prohibir el uso de la ecuación de Hazen-Williams, permitiendo únicamente el empleo de la ecuación de Darcy-Weisbach en conjunto con la ecuación de Colebrook-White. Con respecto a la literatura existente piensa lo mismo, adicionando que el método de las longitudes equivalentes que aun permanece en algunos textos debe desaparecer.

Por último manifiesta que PAVCO ha invertido fuertes sumas de dinero en la caracterización de sus tuberías y de sus accesorios, determinando para los mismos los valores de la rugosidad absoluta y los valores de los coeficientes de pérdidas menores; este avance y esfuerzo debe ser valorado por los diseñadores, a los cuales recomienda aprovechar la base de datos existente para cada tubería lo que les permitirá el empleo de las ecuaciones físicamente basadas.

### ***2.3.2 Ingeniero Sanitario Gustavo Navia Paz***

Egresado de la Universidad del Valle en el año 1982, realizó especialización en la Universidad Nacional sede Manizales en Ingeniería Ambiental con énfasis en Ingeniería Sanitaria en el año 2007; en la actualidad se desempeña como director del departamento de Acueductos y Alcantarillados de la empresa INGETEC – Ingenieros Consultores. A lo largo de su trayectoria profesional ha obtenido 15 años aproximadamente de experiencia específica en lo relacionado al diseño de las redes de distribución.

Aunque inició diseñando las redes de acueducto con la ecuación de Hazen-Williams, con el devenir de los avances tecnológicos evidenció que existían programas como EPANET,



WATERCAD, entre otros que facilitaban el empleo de ecuaciones que requieren de cálculos y procesos iterativos, lo que lo indujo al uso constante de la ecuación de Darcy-Weisbach.

Para el diseño de las redes de distribución, y por políticas de la empresa, todos los miembros del departamento que dirige usan la ecuación de Darcy-Weisbach en conjunto con la ecuación de Colebrook-White por ser ecuaciones racionales y ecuaciones físicamente basadas respectivamente; así mismo, está restringido el uso de la ecuación de Hazen-Williams por la incertidumbre de los resultados obtenidos a través de ella.

En su experiencia, y particularmente los trabajos que actualmente INGETEC adelanta para los Planes Maestros de Aguas en los departamentos de Cundinamarca y Caldas, en el cual para la mayoría de las redes de los diferentes municipios se trata de ampliación de la cobertura y rediseño y optimización de las mismas, ha evidenciado que el empleo de la ecuación de Hazen-Williams en el diseño inicial en décadas anteriores arrojó diámetros mayores a los necesarios, lo que produce en esos sistemas velocidades y presiones bajas, obligando al cambio de diámetros para mejorar las condiciones de operación.

Lo anterior lo han podido constatar adelantando un catastro de la red, modelando el sistema en programas como EPANET con la ecuación de Darcy-Weisbach y Colebrook-White, metodología con la cual han obtenido diámetros menores; por este motivo recomienda que en la academia y en las normas existentes se enciendan las alarmas sobre el empleo de la ecuación de Hazen-Williams, recomendando que su empleo sea restringido ya que en la

actualidad existen las herramientas computacionales necesarias para el empleo de las ecuaciones físicamente basadas.

Respecto a las normas existentes ve viable que se exija únicamente el empleo de la ecuación de Darcy-Weisbach en conjunto con la de Colebrook-White; aparte de lo anterior considera que la norma debe permitir el empleo de diámetros de menor tamaño para algunas comunidades, pues generalmente los diámetros mínimos requeridos sobrestiman el diseño incrementando los costos de construcción y operación.

Por último considera que el éxito que ha tenido la ecuación de Hazen-Williams radica en la facilidad de su empleo por ser una ecuación explícita para el cálculo de las variables; con respecto a la estimación de las pérdidas por accesorios siempre ha empleado la metodología de la cabeza de velocidad multiplicada por el coeficiente de pérdidas de cada uno de los accesorios ya que considera que no es válida la metodología de las Longitudes Equivalentes.

### ***2.3.3 Ingeniera Sanitaria Paola Urrego***

Egresada de la Universidad de Antioquia en el año 2005, obtuvo grado en la Maestría en Ingeniería con énfasis en Recursos Hidráulicos en la Universidad Nacional sede Bogotá en el año 2011. En la actualidad se desempeña como Ingeniera de Diseño de la Dirección de Gestión Ambiental de la Jefatura de Ingenieros del Ejército Nacional; su experiencia profesional se ha dividido entre el diseño de plantas de tratamiento de agua potable y de aguas residuales y el diseño de las redes de acueductos y alcantarillados.

La ecuación que emplea para los diseños es la ecuación de Hazen-Williams aduciendo que en comparación con el empleo de Darcy-Weisbach la diferencia no es representativa; las herramientas empleadas para la modelación son hojas de cálculo de Excel, de aquí que por esta herramienta sea más fácil la aplicación de esa ecuación.

No está de acuerdo con el empleo de la metodología de las longitudes equivalentes, en razón a que físicamente no es una metodología correcta, ya que no puede remplazarse el efecto local de pérdidas producidas por un accesorio por una longitud adicional de la tubería.

Aunque es consiente que se debe racionalizar el empleo de la ecuación de Hazen-Williams y fortalecer el empleo de la ecuación de Darcy-Weisbach, considera que por no ser las redes que diseña redes de gran tamaño, el empleo de una u otra ecuación es indiferente en razón a los resultados obtenidos; sin embargo, para redes de gran tamaño estima que si es necesario el empleo de las ecuaciones físicamente basadas.

Con respecto a las limitaciones de la ecuación de Hazen-Williams no cree que estas restrinjan su uso, aunque las conoce ha podido verificar sus diseños y su correcto funcionamiento con la ecuación de Darcy-Weisbach sin que perciba cambios significativos como se dijo anteriormente.

### ***2.3.4 Ingeniero Civil Fredy Nicolás Angulo Hernández***

La información analizada de este profesional corresponde a su tesis de grado para obtener el título de Master en Ingeniería Civil de la Universidad de los Andes en el año de 1993, documento supremamente interesante que consigna comentarios de profesionales ampliamente conocidos a nivel mundial y nacional, entre ellos M.H Diskin, Juan Saldarriaga y Luis A. Camacho.

Entre sus aportes menciona que la ecuación de Hazen-Williams arroja diseños más costosos y sobrestimados, y que si bien por otro lado la ecuación de Darcy-Weisbach es una ecuación experimental pudo ser comprobada su racionalidad por el análisis dimensional por lo que puede afirmar que es una ecuación basada en la física clásica.

Muestra las limitaciones de la ecuación de Hazen-Williams, las cuales restringen su uso para diámetros inferiores a dos pulgadas, velocidades superiores a 3 m/s, y solo aplicable para temperaturas entre 15° y 20° centígrados. Considera que una de las mayores debilidades es el coeficiente de fricción (CHW), el cual varía para los distintos sistemas de unidades y fluidos, anotando que este coeficiente debe depender de las condiciones de flujo y de la rugosidad relativa ( $K_s/d$ ).

Respecto a la ecuación de Darcy-Weisbach anota que su éxito y exactitud de los resultados que se obtienen dependen mucho del valor del factor de fricción calculado y que este a su vez tiene su éxito en la buena escogencia del valor de la rugosidad absoluta ( $K_s$ ); sin embargo en

su análisis particular de la tesis, en la cual modeló las redes de acueducto de varios municipios del departamento de Cundinamarca para su rediseño, teniendo en cuenta que este diseño fue realizado con la ecuación de Hazen-Williams y que el rediseño se realizara con la ecuación de Darcy-Weisbach; en el ejercicio pudo evidenciar lo siguiente:

1. Con la ecuación de Darcy-Weisbach se obtienen diámetros correspondientes al 70% de los inicialmente calculados con la ecuación de Hazen-Williams y que solo el 14% de los diámetros de la red se mantuvieron iguales.
2. El aumento en la temperatura no produce cambios significativos en la reducción de los diámetros, resultado diferente al que podría haber esperado.
3. Se obtuvieron reducciones de hasta cuatro diámetros con la escala utilizada (aumento cada  $\frac{1}{2}$  pulgada) empleando la ecuación físicamente basada.
4. El ahorro desde el punto de vista económico usando la ecuación de Darcy-Weisbach puede estar entre un 10% y un 40% en comparación con la misma red si fuera diseñada con la ecuación de Hazen-Williams.
5. Concluye que con los resultados obtenidos se debe realizar una revisión de las normas existentes para las condiciones de uso de la ecuación de Hazen-Williams.

De otra parte menciona que existen otras ecuaciones para el diseño de redes de distribución, serán mencionadas en el presente texto para conocimiento del lector, entendiendo que constituyen la diversidad de la ingeniería hidráulica y que en su mayoría cada una de ellas se han desarrollado para materiales de tuberías y casos particulares así:

1. Ecuación de Kozeny, ecuación únicamente válida para Asbesto-Cemento y para flujos con Números de Reynolds menores a 4000 ( $Re \leq 4000$ ); se debe emplear en conjunto con la ecuación de Darcy-Weisbach.

$$f = \frac{2g}{(7.78 \log Re - 5.95)^2}$$

**Ecuación 12 Ecuación de Kozeny para el calculo del factor de fricción.**

2. Ecuación de Richter, ecuación válida para PVC y para Números de Reynolds menores a 4000 ( $Re \leq 4000$ ), se debe usar en conjunto con la ecuación de Darcy-Weisbach.

$$f = 0.01113 + \frac{0.917}{Re^{0.41}}$$

**Ecuación 13 Ecuación de Richter para el cálculo del factor de fricción.**

3. Ecuación de Choder y Dawson, ecuación para el cálculo de la velocidad, considerada una derivación matemática de la ecuación de Darcy-Weisbach.

$$v = \sqrt{\frac{2g}{1000f}} D^{1/2} h_f^{1/2}$$

**Ecuación 14 Ecuación de Choder y Dawson para el cálculo de la velocidad.**

4. Referente a las pérdidas menores, existen ecuaciones que remplazan las pérdidas por una pérdida por fricción para un tramo adicional de tubería como una buena aproximación, es decir se utiliza un tubo de longitud equivalente, en el que se tenga una pérdida de cabeza igual a la pérdida por fricción y pérdida menor en el tubo.

$$L_e = L_0 + \Delta L$$

**Ecuación 15 Ecuación para el cálculo de la Longitud Equivalente.**

en donde:

$L_0$  : Longitud original del tubo en m.

$\Delta L$  : Longitud adicional en m.

El valor de la longitud adicional se calcula de formas diferentes dependiendo de la ecuación que se emplee para el cálculo de las pérdidas de fricción así:

Para la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$\Delta L = \sum K_m \frac{D}{f}$$

**Ecuación 16 Ecuación para el cálculo de la Longitud adicional empleando Darcy-Weisbach.**

en donde:

$\sum K_m$  : Sumatoria de coeficientes de pérdidas menores en la longitud L.

$D$  : Diámetro de la tubería en m.

$f$  : Factor de fricción de Darcy.

Para la ecuación de Hazen-Williams:

$$\Delta L = 0.00773 \sum K_m Q^{0.148} C^{1.852} D^{0.8703}$$

**Ecuación 17 Ecuación para el cálculo de la longitud adicional empleando Hazen-Williams.**

en donde:

$\sum K_m$  : Sumatoria de coeficientes de perdidas menores en la longitud L.

$Q$  : Caudal de diseño.

- $D$  : Diámetro de la tubería.
- $C$  : Factor de fricción de Hazen-Williams CHW.

Por último en su documento encontramos notas tomadas de investigaciones de otros profesionales como Juan Saldarriaga, quien en conjunto con Luis A. Camacho realizaron estudios que muestran que en el 90% de los casos de diseños de tuberías simples la ecuación de Hazen- Williams arroja diámetros mayores a los que pueden ser obtenidos con la ecuación de Darcy-Weisbach.

### ***2.3.5 Ingeniera Civil María Elvira Guevara***

La ingeniera María Elvira es poseedora de una amplia carrera de investigación en el área de la Hidráulica, egresada de la Universidad del Cauca en 1981; adelantó especialización en Ingeniería Hidráulica en el International Institute For Infrastructural Hydraulic And Environmental Eng en 1985 y posteriormente realizó el Master en Ingeniería Civil con énfasis en Hidráulica en la Universidad de Minesota en el año 1995. Se ha dedicado a la docencia en las áreas de Hidrología, Hidráulica y Socavación en puentes; adicionalmente se dedica a la consultoría y asesoría de proyectos de infraestructura hidráulica.

Como referencia para esta tesis se tomo su publicación Flujo a Presión que realizó como trabajo didáctico para las clases de Hidráulica en la Universidad del Cauca; en este documento en su Numeral 6.1 habla de las pérdidas por fricción, mencionando que existe un gran número



de ecuaciones para el cálculo de las pérdidas por fricción, pero que depende de los factores puntuales del caso a analizar la escogencia de una o de otra fórmula.

La ingeniera Guevara define las pérdidas por fricción como la energía que gasta el flujo en vencer la resistencia al mismo y esta dada por la ecuación general:

$$h_f = S_f L$$

**Ecuación 18 Ecuación general para definir las perdidas por fricción.**

en donde:

$h_f$  : Pérdidas por fricción.

$L$  : Longitud real de la tubería.

$S_f$  : Gradiente Hidráulico.

Explicando esto según la ecuación general de Chézy que el gradiente hidráulico es función del caudal, del diámetro efectivo, y de un coeficiente de resistencia al flujo que tiene en cuenta entre otros la viscosidad del fluido y las rugosidades en el interior del conducto; la ecuación de Chézy desarrollada en el año 1775 es la siguiente:

$$v = C \sqrt{RS_f}$$

**Ecuación 19 Ecuación general de Chézy.**

en donde:

$v$  : Velocidad del fluido.

$C$  : Coeficiente de Resistencia al flujo o coeficiente de Chézy.

$S_f$  : Gradiente Hidráulico.

$R$  : Radio hidráulico.

El coeficiente de fricción de Chézy depende del factor de fricción de Darcy y de la aceleración de la gravedad y puede calcularse para cualquier sistema de unidades con la siguiente ecuación:

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}}$$

**Ecuación 20 Ecuación para el calculo del coeficiente de fricción de Chézy.**

en donde:

$C$  : Coeficiente de resistencia al flujo o coeficiente de Chézy.

$g$  : Aceleración de la gravedad.

$f$  : Factor de fricción de Darcy.

Aunque es una ecuación explícita para  $C$ , se requiere del cálculo del factor de fricción; este valor puede ser calculado por diferentes ecuaciones de acuerdo con las características del régimen de flujo. La mayoría de estas ecuaciones fueron mencionadas anteriormente; entre ellas se encuentran la Ecuación de Blasius, Ecuación de Nikuradse para tubos lisos y rugosos en la zona turbulenta, Ecuación de Prandtl-Von Karman, Ecuación de Swamee-Jain y por supuesto la ecuación de Colebrook-White.

La Ingeniera Guevara habla de la ecuación de Hazen-Williams como una ecuación empírica independiente a la corriente de Darcy-Weisbach que ha sido muy exitosa; sin embargo menciona que tiene las siguientes restricciones:

1. El coeficiente de velocidad CHW de Hazen-Williams se puede asimilar a una medida de la rugosidad relativa ya que no es una característica física del conducto, como si lo es el coeficiente de rugosidad absoluta que se utiliza para obtener el factor de fricción  $f$  de la ecuación de Colebrook-White.
2. El fluido debe ser agua a temperaturas normales.
3. El diámetro debe ser superior o igual a 2 pulgadas.
4. La velocidad en las tuberías se debe limitar a 3 m/s.

Menciona además que la ecuación de Hazen-Williams tiene la ventaja de ser explícita para las pérdidas por fricción, la velocidad o el caudal, lo cual hace su uso muy sencillo y de allí que se haya popularizado tanto especialmente entre los ingenieros civiles y sanitarios de los Estados Unidos, lo que ha influenciado también a profesionales de países como Colombia. Es consiente que esta ecuación tiende a sobrestimar los diámetros requeridos; además, teniendo en cuenta el gran auge de los computadores, no ve dificultad alguna en el uso de una ecuación como la de Darcy-Weisbach, utilizada conjuntamente con la ecuación de Colebrook-White, ecuación que no tiene restricciones y que se ha vuelto de uso muy popular sobre todo en Europa.

#### ***2.4 Modelación de red y comparación de resultados obtenidos con diferentes ecuaciones.***

Con el propósito de verificar lo expresado por los distintos autores, textos y normas en relación a las diferentes ecuaciones y a las características de sus resultados, se estableció un

modelo de una red de distribución de agua potable, será modelada y evaluada con las ecuaciones de Hazen-Williams con su correspondiente factor de fricción (CHW), y con la ecuación de Darcy-Weisbach en conjunto con la ecuación de Colebrook-White; los resultados obtenidos serán analizados y serán un aporte para las conclusiones y recomendaciones de este trabajo de tesis.

### **2.4.1 Características de la Red**

Para el ejercicio se seleccionó una red de distribución cerrada que corresponde a la red de acueducto del corregimiento de Tapartó del municipio de Andes, departamento de Antioquia, Ejemplo 7.4 que se encuentra en el texto Acueductos Teoría y Diseño. Se trató de mantener las características idénticas de la red; sin embargo se realizaron algunas modificaciones.

Para efectos de esta modelación se emplea tubería en PVC con una rugosidad absoluta  $K_s = 0.0015$  mm, el sistema de alimentación es por gravedad; el programa de modelación empleado es EPANET versión 2, la temperatura del agua supuesta es  $t = 20^\circ\text{C}$ , con viscosidad cinemática  $\nu = 0.000001007$  m<sup>2</sup>/s, los diámetros son variables de acuerdo con cada caso en particular; a continuación se presentan en tablas otros parámetros de interés.

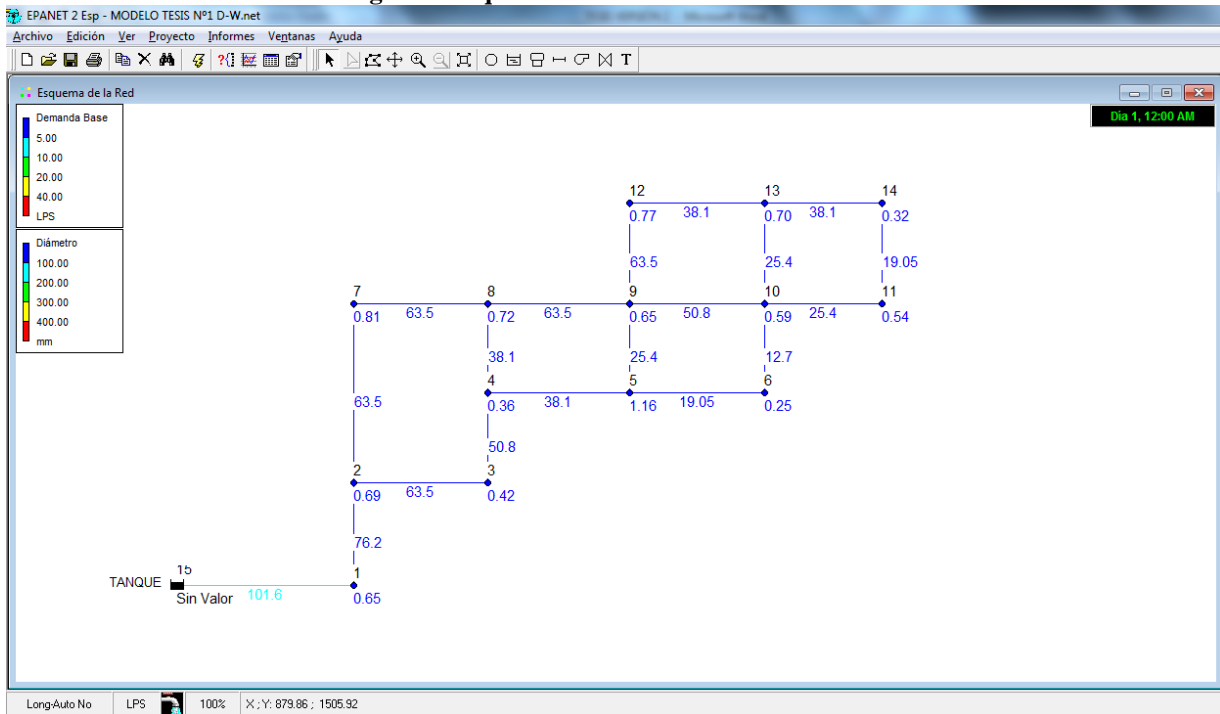
**Tabla 3 Propiedades fijas en los nudos.**

Identificación	Cota (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Presión mínima en m.c.a
1	1324.53	6000	15
2	1328.15	6370	15
3	1321.74	3854	15
4	1321.85	3312	15
5	1314.74	10730	15
6	1308.45	2346	15

7	1328.92	7452	15
8	1324.50	6696	15
9	1318.64	6016	15
10	1311.99	5456	15
11	1307.64	4960	15
12	1319.13	7125	15
13	1315.30	6450	15
14	1310.00	2960	15
15	1355.00		

Se muestra el esquema gráfico de la red visto en planta; los valores de color azul en cada nudo corresponden a la demanda requerida en litros por segundo para la primera suposición, los valores en color azul sobre las líneas corresponden a los diámetros de los tubos en milímetros, y los valores en color negro sobre los nudos corresponden a la identificación (ID) de cada uno.

**Figura 3 Esquema de la red de distribución.**



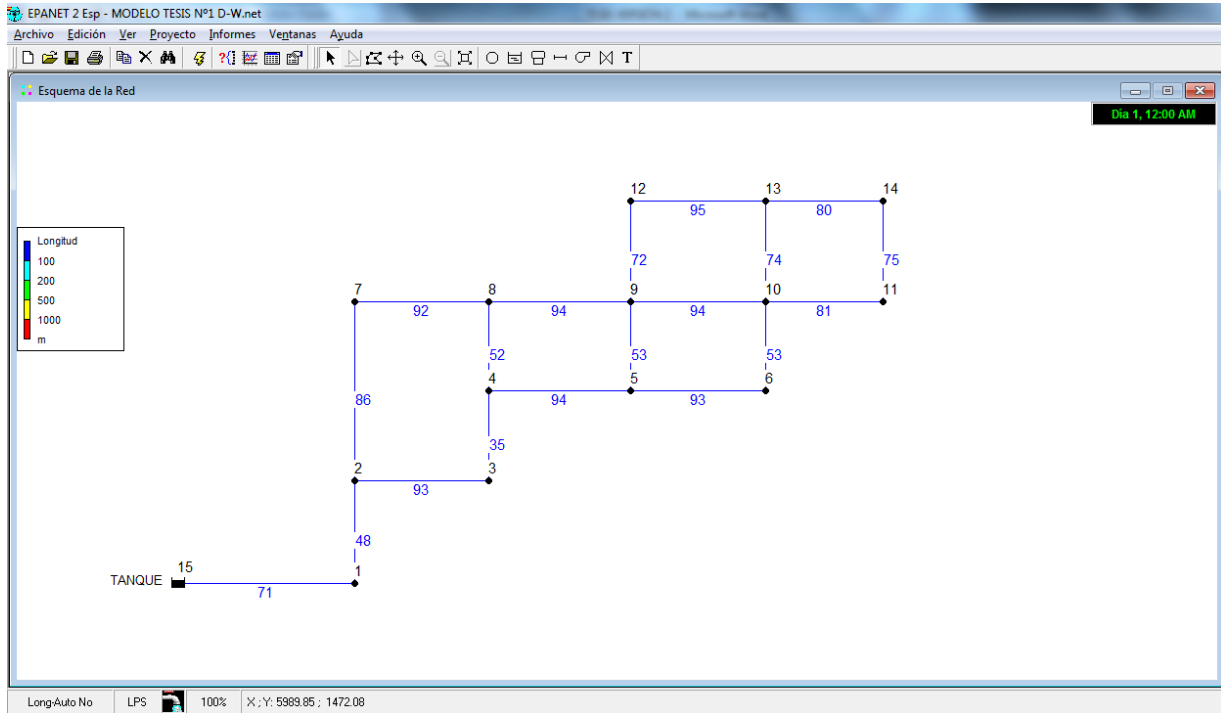
Las propiedades fijas de las tuberías son las siguientes:

**Tabla 4 Propiedades fijas en las tuberías**

Identificación	Longitud (m)	Tramo	Material
1	48	1-2	PVC
2	93	2-3	PVC
3	35	3-4	PVC
4	94	4-5	PVC
5	93	5-6	PVC
6	86	2-7	PVC
7	92	7-8	PVC
8	94	8-9	PVC
9	94	9-10	PVC
10	81	10-11	PVC
11	52	4-8	PVC
12	53	2-9	PVC
13	53	6-10	PVC
14	72	9-12	PVC
15	74	10-13	PVC
16	75	11-14	PVC
17	95	12-13	PVC
18	80	13-14	PVC
19	71	15-1	PVC

A continuación se muestra el esquema gráfico de la red visto en planta haciendo énfasis en la tubería, los valores de color azul en cada tubo corresponden a la longitud del mismo en metros y los valores en color negro sobre los nudos corresponden a la identificación (ID) de cada uno.

**Figura 4 Esquema de la red de distribución - propiedades fijas en los tubos.**



Existen datos fijos en los nudos y en los tubos; el propósito es variar algunos parámetros de la topología de la red para identificar rangos de validez y diferencias en los resultados obtenidos con la ecuación de Hazen-Williams y la ecuación de Darcy-Weisbach.

### 2.4.2 Primera simulación

Como se dijo anteriormente existen unos parámetros de la red que serán fijos, y otros como los caudales y los diámetros serán variados para ver los resultados y compararlos. La primera simulación se realizó con los datos de caudal y diámetros suministrados por el texto que se menciono anteriormente; los resultados que serán observados serán las pérdidas por fricción en la red y las presiones, pues al ser EPANET un programa de comprobación de diseño carente de algoritmos genéticos no se obtendrían diámetros individuales diseñados. Así mismo, al ingresar

un caudal demandado en cada nudo, el programa garantizara el cumplimiento de los mismos; sin embargo podrán variar las presiones en los nudos.

Los detalles de los datos con que se alimentaron cada una de las simulaciones podrán ser consultados en los anexos, siendo el Anexo N°1 los datos y resultados de la simulación N°1 y así sucesivamente; se usaron las siguientes convenciones: (D-W) para la ecuación de Darcy-Weisbach en conjunto con la ecuación de Collebrook-White, y (H-W) para la ecuación de Hazen-Williams con su respectivo factor de fricción.

**Tabla 5 Resultados simulación N°1.**

Nudo	Presión (m.c.a)		Tubo	Diámetro (mm)	Pérdidas por fricción (m/km)	
	D-W	H-W			D-W	H-W
1	29.75	29.74	1	76.2	34.9	36.17
2	24.46	24.38	2	63.5	15.26	15.32
3	29.45	29.37	3	50.8	34.23	34.72
4	28.14	28.04	4	38.1	36.13	35.51
5	31.86	31.81	5	19.05	32.34	28.08
6	35.14	35.49	6	63.5	26.46	26.58
7	21.41	21.33	7	63.5	18.04	17.85
8	24.17	24.1	8	63.5	21.18	21.22
9	28.04	27.97	9	50.8	10.1	9.66
10	33.74	33.71	10	25.4	35.24	31.8
11	35.24	35.49	11	38.1	25.35	24.77
12	27.19	27.14	12	25.4	1.63	1.04
13	29.24	29.3	13	12.7	40.46	33.18
14	34.09	34.2	14	63.5	4.99	4.7
15	Tanque	Tanque	15	25.4	16.06	14.83
			16	19.05	16.19	14.3
			17	38.1	18.72	17.54
			18	38.1	5.65	5.07
			19	101.6	10.08	10.3



Como se puede observar, en el cuadro existen diámetros que están fuera del rango de validez de la ecuación de Hazen-Williams, para este caso, se desprende del análisis de los resultados que generalmente para diámetros inferiores a dos pulgadas donde la ecuación de H-W según algunos autores no tiene validez, se obtienen pérdidas menores a las calculadas con D-W; es decir, con la ecuación de H-W para diámetros inferiores a dos pulgadas se subestiman las pérdidas por fricción en la red de distribución, lo que puede generar cálculos erróneos en los sistemas de distribución por presión.

Si bien en algunos tubos no es representativa la diferencia, en algunos de ellos se encontraron diferencias de un 18% por debajo para las pérdidas calculadas con H-W en comparación con las calculadas con D-W.

De los 19 tubos de la red, 13 de ellos registran pérdidas mayores por D-W; en esos 13 tubos los diámetros están por fuera del rango de validez de la ecuación de H-W.

### ***2.4.3 Segunda simulación***

En este caso todos los diámetros de acuerdo con lo expresado por algunos autores están dentro del rango de validez de la ecuación de Hazen-Williams, es decir diámetros superiores a dos pulgadas; se mantiene la geometría en planta de la red y se variaron los caudales. Para este caso en particular los datos y resultados completos se pueden observar en el Anexo N°2.

**Tabla 6 Resultados simulación N°2.**

Nudo	Presión (m.c.a)		Tubo	Diámetro (mm)	Pérdidas por fricción (m/km)	
	D-W	H-W			D-W	H-W
1	24.9	24.51	1	101.6	68.09	72.76
2	18.01	17.39	2	101.6	20.62	21.53
3	22.51	21.8	3	101.6	15.18	15.74
4	21.86	21.14	4	101.6	11.2	11.45
5	27.92	27.17	5	101.6	6.87	6.86
6	33.57	32.83	6	101.6	16.81	17.38
7	15.8	15.13	7	101.6	15.51	16
8	18.79	18.08	8	101.6	11.21	11.5
9	23.6	22.86	9	76.2	10.68	10.7
10	29.24	28.5	10	76.2	7.1	6.92
11	33.02	32.29	11	50.8	8.15	7.96
12	22.41	21.66	12	50.5	8.02	7.9
13	25.76	25.02	13	76.2	14.9	14.83
14	30.38	29.67	14	76.2	9.69	9.77
15	Tanque	Tanque	15	101.6	2.35	2.25
			16	76.2	3.72	3.51
			17	50.8	5.05	4.93
			18	50.8	8.51	8.22
			19	101.6	78.43	83.99

Se observa que disminuyen el número de tubos en los que la ecuación de D-W arroja pérdidas mayores a la ecuación de H-W, en la primera simulación 13 tubos tenían pérdidas mayores con D-W; en este caso solo 7 tienen pérdidas mayores, es decir cuando los diámetros inician a estar en los rangos de validez de la ecuación de H-W esta ecuación tiende a sobrestimar las pérdidas por fricción.

Como en la primera simulación no se observan variaciones considerables en las presiones de servicio cuando se ejecuta la simulación con las diferentes ecuaciones.

### 2.4.4 Tercera simulación

Para este caso se aumentan los caudales hasta 10 litros por segundo, y los diámetros se encuentran todos entre 3 y 6 pulgadas; es decir en este punto y en lo relacionado a los diámetros todos los autores, normas y profesionales de la ingeniería consultados están de acuerdo con el rango de validez de la ecuación de H-W; lo mismo pasa con la temperatura que se escogió para todas las simulaciones en 20°C. Así mismo, como se puede observar ninguna de las velocidades supera los 3 m/s, lo que en conclusión quiere decir que están dadas las condiciones de validez más representativas para la ecuación de H-W, después de la simulación se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 7 Resultados simulación N°3.**

Nudo	Presión (m.c.a)		Tubo	Diámetro (mm)	Pérdidas por fricción (m/km)	
	D-W	H-W			D-W	H-W
1	28.9	28.78	1	177.8	33.46	36.08
2	23.67	23.43	2	152.4	18.13	19.27
3	28.4	28.05	3	152.4	12.9	13.63
4	27.84	27.46	4	152.4	8.71	9.08
5	34.13	33.71	5	152.4	2.61	2.63
6	40.18	39.76	6	152.4	15.15	16.03
7	21.6	21.28	7	152.4	11.88	12.5
8	24.93	24.55	8	152.4	7.46	7.8
9	30.09	29.67	9	152.4	2.78	2.81
10	36.48	36.06	10	101.6	3.06	3.05
11	40.58	40.16	11	76.2	4.98	5
12	29.47	29.06	12	127	2.66	2.64
13	33	32.59	13	127	3.02	3.01
14	38.19	37.77	14	152.4	1.73	1.74
15	Tanque	Tanque	15	152.4	2.24	2.22
			16	101.6	0.42	0.39
			17	101.6	3.19	3.19
			18	152.4	1.43	1.4
			19	203.2	22.11	23.81

---

Se observa en los resultados que para esta simulación ya los valores obtenidos en las pérdidas son mayores si se calculan con H-W; la tendencia es que entre mayores sean los diámetros y mayor el tamaño de la red más representativa será esta diferencia, concluyendo que la ecuación de H-W es aceptable para diámetros entre 2 y 6 pulgadas y para tamaños medianos y pequeños de redes de distribución.

### **3 METODOLOGÍA**

---

Con el propósito de adelantar el presente trabajo, se adelantó la metodología que se explica a continuación:

- Se consultó la literatura de autores colombianos relacionada con el diseño de tuberías para redes de distribución de agua potable, paralelamente el RAS 2000 y artículos disponibles en universidades nacionales, páginas web, seminarios y otras fuentes de información.
- Se analizó la información recopilada, tratando de encontrar en la misma la justificación de los autores para el empleo de las ecuaciones que citen en sus textos, comparar lo encontrado con lo establecido en el RAS 2000 tomándolo como parámetro del estado colombiano para el diseño de RDAP.
- Se realizaron entrevistas dentro de las posibilidades a consultores y diseñadores, con la finalidad de obtener de primera mano su criterio para el empleo de las ecuaciones más utilizadas.
- Se estableció un esquema de red de distribución para un caso en particular, aplicando en él las distintas ecuaciones con el propósito de obtener resultados para cada una de ellas, teniendo en cuenta en lo anterior las condiciones generales de los diseños usados en el país.

- 
- Por último se analizaron los resultados obtenidos, indicando la favorabilidad o no del empleo de las ecuaciones estudiadas para diseños de RDAP en el territorio colombiano; en este aparte se hicieron recomendaciones y se establecieron a juicio conclusiones que permitan orientar futuros trabajos relacionados con este tema.

---

## 4 CONCLUSIONES

---

- A pesar de los avances tecnológicos en relación a las herramientas computacionales, algunos autores en sus textos siguen recomendando el empleo de la ecuación de Hazen-Williams, situación que en la mayoría de los casos arroja diámetros y pérdidas por fricción mayores a los calculados con la ecuación de Darcy-Weisbach, obteniendo diseños más costosos en la construcción y operación.
- El éxito de la ecuación de Hazen-Williams radica en la facilidad de su empleo para la realización de los cálculos de diámetros, velocidades y pérdidas por fricción.
- Existen profesionales dedicados al diseño que ignoran las restricciones de la ecuación de Hazen-Williams en cuanto a los rangos de velocidad, diámetros, temperaturas y régimen de flujo.
- La normatividad técnica en general a nivel nacional sigue permitiendo el empleo de la ecuación de Hazen-Williams, teniendo en cuenta sus rangos de validez y exactitud.
- No existe un consenso entre los autores y consultores en relación con la exactitud de los rangos de validez de la ecuación de Hazen-Williams; algunos citan que el diámetro mínimo debe ser de 4 pulgadas y otras referencias hablan de diámetros mínimos de 3 y hasta 2 pulgadas, generando ambigüedad y aumentando la probabilidad de errores en el cálculo.

- Los profesionales del medio dedicados al diseño de redes de distribución, en representación de sus respectivas empresas donde laboran, han adquirido la conciencia de usar para los diseños la ecuación de Darcy-Weisbach en conjunto con la ecuación de Colebrook-White.
- Indudablemente los avances computacionales han permitido que la ecuación racional de Darcy-Weisbach se imponga ante la ecuación empírica de Hazen-Williams; este aspecto según los autores y diseñadores se convirtió en años anteriores en la principal desventaja de la ecuación de Darcy-Weisbach por la complejidad de sus cálculos.
- Con la ecuación de Hazen-Williams para diámetros inferiores a dos pulgadas se subestiman las pérdidas por fricción en la red de distribución, lo que puede generar cálculos erróneos en los sistemas de distribución.
- Cuando en las modelaciones hidráulicas los diámetros inician a estar en los límites de los rangos de validez de la ecuación de Hazen-Williams, esta ecuación tiende a sobrestimar las pérdidas por fricción, por ende la potencia de las bombas o diámetros, tendiendo a incrementar los valores de consumo de energía eléctrica o costos de construcción.
- La ecuación de Hazen-Williams arroja resultados cercanos a los obtenidos con Darcy-Weisbach para diámetros entre 3 y 6 pulgadas con velocidades inferiores a 3 m/s y a temperatura normal (entre 15 y 20 grados centígrados), la temperatura en los rangos normales de distribución de agua potable no incide en los resultados obtenidos.



- 
- Si bien para algunos casos los datos obtenidos con Hazen-Williams y Darcy-Weisbach son muy parecidos, no se justifica usar una ecuación empírica y aproximada si existe un método físicamente basado y con muy buena precisión.

---

## 5 *RECOMENDACIONES*

---

- Estandarizar en el medio de la ingeniería hidráulica nacional los valores de los rangos de valides de la ecuación de Hazen-Williams, toda vez que existen diferencias sobre los mismos entre autores de textos y profesionales dedicados al diseño.
- Crear desde la academia conciencia sobre el uso de las ecuaciones empíricas, enseñándolas más como un antecedente en el cálculo de las redes de distribución que como una alternativa para el mismo, y fomentar al mismo tiempo el empleo de las ecuaciones físicamente basadas.
- Revisar lo antes posible las normas técnicas colombianas restringiendo el empleo de la ecuación de Hazen-Williams como una alternativa para el cálculo de diámetros de tuberías y pérdidas por fricción, lo anterior en razón a sus limitaciones, concepción científica e ingenieril y exactitud.
- Para evitar incertidumbre con los resultados de la modelación de redes, es recomendable emplear la ecuación de Darcy-Weisbach en conjunto con la ecuación de Colebrook-White.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

---

ANGULO HERNÁNDEZ, Freddy Nicolás. Efecto de diferentes tipos de ecuaciones en el diseño final de redes de acueducto. Bogotá, 1993, 234 p. Tesis (Magister en Ingeniería Civil). Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería.

CORCHO ROMERO, Freddy Hernán y DUQUE SERNA, José Ignacio. Acueductos: Teoría y diseño. 3 ed. Medellín: Sello editorial universidad de Medellín, 2005. 640p.

EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ. Sistema de Información de Normalización y Especificaciones Técnicas: NS-033 Criterios para diseño de red matriz; NS-034 Criterios para diseños de conducciones y líneas expresas; NS-036 Criterios para diseño de red de acueducto secundaria y menor distribución. Bogotá: 2000, 545p. (SISTEC).

EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN E.S.P. Normas de Diseño de Sistemas de Acueducto de EPM. Medellín: 2009, 244p.

GUEVARA, María Elvira. Flujo a presión. En: Flujo a presión. [en línea]. [consultado 26 sep. 2011]. Disponible en <<http://artemisa.unicauca.edu.co/~hdulica/fpresion.pdf>>

LÓPEZ CUALLA, Ricardo Alfredo. Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados. 2 ed. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2003. 546p.

MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico: Sistema de acueductos. Bogotá: 2000, 206p. (RAS 2000).

PÉREZ CARMONA, Rafael. Instalaciones hidrosanitarias y de gas para edificaciones. 6 ed. Bogotá: ECOE, 2010. 546p.

SALDARRIAGA VALDERRAMA, Juan Guillermo. Hidráulica de tuberías: Abastecimiento de agua, redes, riegos. Bogotá: Alfaomega, 2007. 690p.

## ***ANEXOS***

---