

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1 Introducción

Las conducciones de agua son parte de las obras hidráulicas que permiten el suministro de agua potable, agua para riego, agua para fines industriales, minería, etc. a una población o un lugar en específico. Estas conducciones forman parte de los sistemas de aprovechamiento hídrico ya sea por gravedad o bombeo.

Los sistemas de conducción a presión, en los últimos años se han incrementado sustancialmente en relación a los sistemas de conducción mediante canales, a pesar de que su costo es considerablemente mayor, asimismo se generaliza el uso de conducción a presión para cualquier finalidad, teniendo mayor presencia en sistemas de riego donde los diámetros son de mayor envergadura.

Las ecuaciones más empleadas para calcular las pérdidas por fricción son: la ecuación de Darcy-Weisbach, ecuación físicamente basada, y la ecuación de Hazen-Williams, ecuación de origen experimental que es válida solamente en los rangos investigados para su formulación. En la actualidad se considera que la ecuación de Darcy-Weisbach es la más complicada para calcular las pérdidas de carga, sobre todo a partir de la formulación propuesta por Colebrook-White para calcular el coeficiente de fricción ( $f$ ), no obstante, se puede decir que esta se puede aplicar para cualquier fluido, rango de velocidades, diámetros y longitudes de tubería, debido a que es una ecuación físicamente basada. Sin embargo, en la primera mitad del siglo XX, el cálculo de las pérdidas por fricción por medio de esta ecuación se dificultó, ya que el factor de fricción de esta era un parámetro difícil de cuantificar analíticamente. Esto se refleja en la ecuación de Colebrook-White, la cual requiere algún método numérico para calcular el factor de fricción, debido a que es una ecuación logarítmica no explícita para esta variable hidráulica.

Dicho problema ocasionó la aparición de ecuaciones empíricas más sencillas de utilizar como la ecuación de Hazen-Williams, la cual presenta la ventaja de ser explícita para la velocidad y el caudal, pero presenta inconvenientes desde el punto de vista hidráulico, dado que utiliza un coeficiente de rugosidad que no depende solamente de la rugosidad absoluta de la tubería, sino de la velocidad y la magnitud del diámetro, así como de las propiedades

del fluido.

Por lo anterior, el uso de la ecuación de Hazen-Williams frente a la ecuación de Darcy-Weisbach no se debería justificar por su facilidad de manejo, la cual es relativa debido a la popularización del uso de las computadoras que permite resolver de forma sencilla ecuaciones implícitas como la ecuación de Colebrook-White, sino por los efectos que tenga el uso de esta en el diseño y análisis de redes de conducción de agua desde el punto de vista hidráulico, teniendo en cuenta el creciente aumento de la demanda de agua en ciudades, la continua operación y las características de las tuberías de estas redes.

Esto podría establecer realmente cómo debería utilizarse dicha ecuación empírica en la práctica de la ingeniería, ya que su aplicación inadecuada podría determinar si una red de conducción de agua estaría en capacidad de suministrar agua a una determinada población, parcela o industria dado que se podría estar perdiendo mayor cantidad de energía que la esperada, lo cual no permitiría cumplir con las presiones mínimas exigidas en las normativas de cada uno de los países del mundo.

Por esta razón, en el presente documento se analizará el efecto del uso de la ecuación de Darcy-Weisbach frente a la ecuación de Hazen-Williams para 5 materiales diferentes (FF, FFD, FG, PVC y PEAD) y se propone un programa con la capacidad de corregir el coeficiente de Hazen-Williams.

Por ello, este documento está estructurado de la siguiente manera:

El Capítulo 1 contiene los objetivos de la tesis, explicando lo que se buscó con el desarrollo del proyecto.

El Capítulo 2 muestra la base teórica necesaria para llevar a cabo este proyecto. En este se hace una breve reseña histórica del desarrollo de la ecuación de Darcy-Weisbach y de la ecuación de Hazen-Williams. Igualmente, se resume la revisión bibliográfica realizada en cuanto a los antecedentes del efecto de uso de estas ecuaciones en tuberías.

El Capítulo 3 contiene la metodología que se aplicó para establecer el efecto del uso de estas ecuaciones de resistencia fluida en el diseño y análisis de conducciones de agua.

El Capítulo 4 presenta los resultados obtenidos en el análisis de estas ecuaciones en las conducciones de agua, se ilustra el análisis de estos resultados y se propone un programa con la capacidad de corregir el coeficiente de Hazen-Williams.

## **1.2. Planteamiento del Problema**

Identificadas las necesidades para la vida del ser humano, se encuentra en primer lugar el agua, tanto para su consumo como para la satisfacción de sus demás necesidades.

Teniendo en cuenta la importancia que tienen las conducciones de agua como pieza fundamental del desarrollo de una sociedad, a través de la historia el análisis y diseño de este tipo de obras hidráulicas se ha convertido en el principal objetivo de los ingenieros. Para llevar a cabo dicho propósito, es necesario establecer con certeza la magnitud de las pérdidas por fricción que se generan en las tuberías, dado que estas determinan la magnitud de los diámetros, la distribución de presiones en los nudos y los caudales en cada una de estas. Las ecuaciones más empleadas para calcular las pérdidas por fricción son: la ecuación de Darcy-Weisbach, ecuación físicamente basada, y la ecuación de Hazen-Williams, ecuación de origen experimental que es válida solamente en los rangos investigados para su formulación, a pesar de hacer un uso indistinto de ambas ecuaciones es necesario hacer un análisis más profundo para poder determinar cuál es el efecto del uso de estas ecuaciones en conducciones de agua y determinar cuál es el porcentaje de error de estas ecuaciones de vital importancia para el abastecimiento de ciudades, centros poblados, industrias, etc.

## **1.3 Formulación del Problema**

¿Cuál es el efecto de los usos de las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Hazen-Williams en la cuantificación de pérdidas por fricción en conducciones de agua a presión por tubería?

## **1.4 Sistematización del problema**

Para dar alternativas de solución al problema planteado, es importante dar respuesta a las siguientes interrogantes:

- ¿Las ecuaciones analizadas son aplicables a cualquier escenario posible?
- ¿Los resultados encontrados son aceptables para el diseño de conducciones de agua por tubería?

- ¿Es posible realizar una corrección a estas ecuaciones buscando mayor precisión en los cálculos?
- ¿Es recomendable el uso de ambas ecuaciones en el diseño de conducciones de agua por tubería en ciertas limitantes?

## 1.5 Objetivos del proyecto

### a) Objetivo General

- Determinar el efecto de la pérdida de carga en un flujo a presión mediante el uso de la ecuación empírica de Hazen-Williams vs la ecuación físicamente basada de Darcy-Weisbach en el comportamiento hidráulico de tuberías.

### b) Objetivos Específicos

- Establecer el efecto en un flujo a presión del uso de la ecuación de Hazen-Williams vs la ecuación de Darcy-Weisbach en el cálculo de las pérdidas por fricción.
- Determinar si los coeficientes de la ecuación de Hazen-Williams ( $C_{hw}$ ) sugeridos en la literatura internacional, deben ser modificados o no, con base en los efectos hidráulicos que tienen en una conducción de agua por tubería a presión.
- Establecer una metodología que permita corregir los valores sugeridos del coeficiente de Hazen-Williams ( $C_{hw}$ ) para un determinado material, que permita minimizar los errores en el cálculo de las pérdidas por fricción al utilizar esta ecuación.

## 1.6 Justificación

Las razones por las cuales se realiza el estudio se justifica por tres razones, las cuales son:

### a) Razones Sociales

Con la aplicación de este proyecto se pretende poder de cierta manera facilitar a estudiantes el desarrollo de análisis en conducciones de agua, mejorar la eficiencia de cálculo en conducciones de agua a presión como ser: redes de aducciones, redes de impulsiones, redes, etc. para el mejor uso de los recursos disponibles en posibles proyectos, los mismos que cumplan con todas las necesidades básicas de la población.

### **b) Razones Académicas**

Profundizar conocimientos adquiridos en el área de la hidráulica en flujo a presión, aplicarlo en la evaluación y análisis de dos diferentes ecuaciones así de esta manera poder evaluar, una de ellas con base científica y la otra empírica pero que se ha popularizado su uso debido a la facilidad de manejo de la misma, con el fin de poder mejorar la precisión en el cálculo en redes de agua potable, redes de aducciones, redes de impulsiones, etc. y mediante este proyecto optar la licenciatura en ingeniería civil.

### **c) Razones Técnicas**

Poder recomendar el uso de las ecuaciones analizadas para pérdidas por fricción con mayor fiabilidad y bondades al momento de emplearlo, confiando en los resultados obtenidos y poder desarrollarlos de manera adecuada y segura para cualquiera sea el diámetro, temperatura, o el régimen en el que se trabaje.

## **CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO**

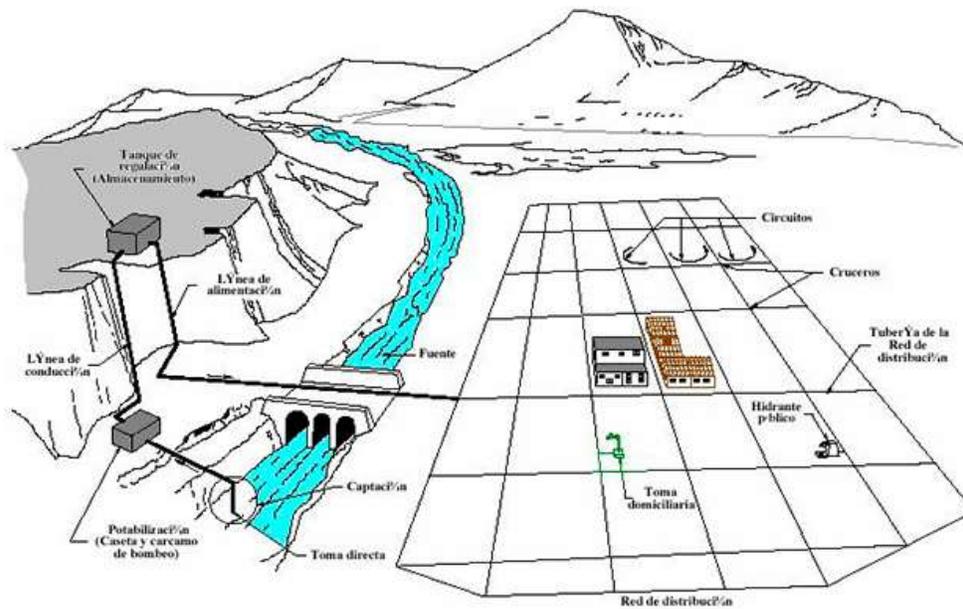
En este capítulo se analizará las propiedades fundamentales de los fluidos, entender estas propiedades es esencial para la aplicación de los principios básicos de la mecánica de fluidos a la solución de problemas prácticos, también trataremos de la velocidad y de sus distribuciones en el espacio limitándonos a fluidos incomprensibles.

### **2.1 Información relativa a las redes de agua**

Una red de abastecimiento de agua es un sistema de obras de ingeniería, concatenadas que permiten llevar hasta la vivienda de los habitantes de una ciudad, pueblo, área rural con población relativamente densa, industrias, etc. el agua.

El sistema de abastecimiento de agua por lo general consta de varias partes principales como ser:

- Captación.
- Aducción
- Almacenamiento de agua no tratada o tratada
- Tratamiento del agua
- Red de distribución
- Conexiones domiciliarias



*Figura 1: Esquema red de agua*

Fuente: <https://www.edic.com/caracteristicas-de-la-red-de-distribucion-de-agua-potable/>

### 2.1.1 Aducción

Es la conducción o transporte de agua desde la obra de toma hasta la planta de tratamiento, tanque de regulación, o directamente a la red, ya sea por tubería, canal o túnel. Los sistemas de aducción pueden ser desarrollados de las siguientes maneras:

- Por gravedad
- Por bombeo
- De manera mixta

### 2.1.2 Redes de distribución

La red de distribución es un conjunto de tuberías, accesorios y dispositivos que permiten el suministro de agua a los consumidores de forma constante, con presión apropiada, en cantidad suficiente y calidad adecuada para satisfacer sus necesidades domésticas, comerciales, industriales, agrícolas y otros usos.

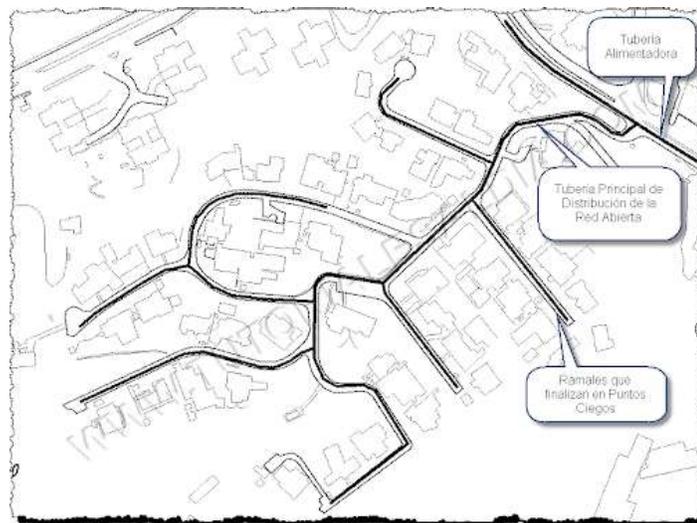


*Figura 2: Esquema red de distribución*

Fuente: <https://www.eadic.com/caracteristicas-de-la-red-de-distribucion-de-agua-potable/>

### 2.1.3 Tipos de redes

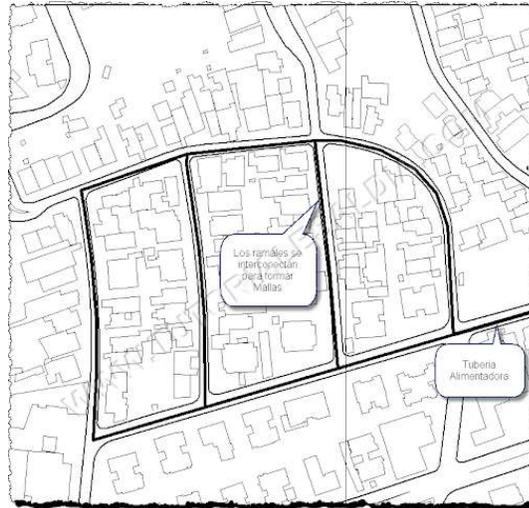
- Red abierta o ramificada: la red está constituida por tuberías que tienen la forma ramificada a partir de una línea principal, este tipo de redes abiertas pueden aplicarse en poblaciones semi dispersas y dispersas o cuando por razones topográficas o de conformación de la población no es posible un sistema cerrado.



*Figura 3: Red abierta o ramificada*

Fuente: <https://www.eadic.com/caracteristicas-de-la-red-de-distribucion-de-agua-potable/>

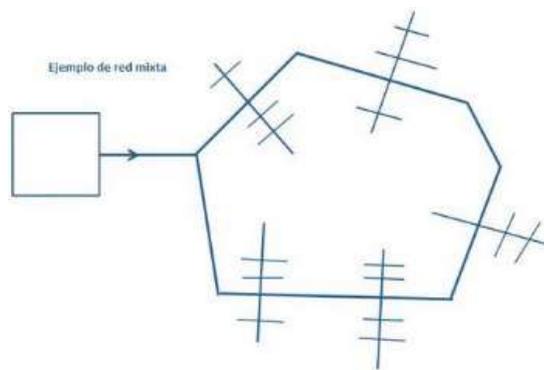
- Red cerrada o anillada: la red está constituida por tuberías que tienen la forma de circuitos cerrados o anillos, la red cerrada puede aplicarse en poblaciones concentradas y semi concentradas mediante redes totalmente interconectadas o redes parcialmente interconectadas, la red puede estar compuesta por una red de tuberías principales y una red de tuberías secundarias.



*Figura 4: Red cerrada o anillada*

Fuente: <https://www.eadic.com/caracteristicas-de-la-red-de-distribucion-de-agua-potable/>

- Red mixta o combinada: de acuerdo a las características topográficas y distribución de la población, pueden aplicarse en forma combinada redes cerradas y redes abiertas.



*Figura 5: Red mixta*

Fuente: <https://www.eadic.com/caracteristicas-de-la-red-de-distribucion-de-agua-potable/>

#### **2.1.4 Presiones de servicio**

La presión de servicio se llama a la presión normal de trabajo del aparato o sistema a la temperatura de servicio.

Para redes de agua potable la norma boliviana (NB 689) nos establece los parámetros durante el periodo de la demanda máxima horario, la presión dinámica mínima en cualquier punto de la red no debe ser menor a:

- Poblaciones iguales o menores a 2000 habitantes 5 m.c.a.
- Poblaciones entre 2001 y 10000 habitantes 10 m.c.a.
- Poblaciones mayores a 10000 habitantes 13 m.c.a.

Para sistemas de riego o abastecimientos industriales las presiones mínimas serán definidas según las necesidades de presión que tenga el sistema.

En aducciones la presión estática máxima de la tubería de aducción no debe ser mayor al 80% de la presión de trabajo especificada por el fabricante, la presión mínima recomendable en cualquier punto de la tubería de aducción, en las condiciones más desfavorables de escurrimiento, debe ser de 2 m.c.a., excepto en los puntos inicial y final de la aducción ligados a un tanque o cámara en contacto con la atmósfera.

Las presiones arriba mencionadas podrán incrementarse observando disposiciones municipales o locales de políticas de desarrollo urbano y según las características técnicas del sistema de distribución.

#### **2.1.5 Velocidades permisibles**

Los efectos de la velocidad del fluido en una tubería son amplios y muchas veces perjudiciales es por eso que la norma boliviana (NB 689) también hace mención al rango de velocidades en las cuales se debe trabajar, la velocidad mínima en una red de distribución de agua potable en ningún caso debe ser menor a 0,3 m/s para garantizar la auto limpieza del sistema. Para poblaciones pequeñas, se aceptaran velocidades menores, solamente en ramales secundarios. La velocidad máxima en la red de distribución no debe ser mayor a 2 m/s, estos parámetros bajo un justificativo pueden ser superados.

Para aducciones la velocidad máxima debe ser considerada en función del tipo de material de la tubería de acuerdo a la tabla 6

*Tabla 1: Velocidad máxima permisible en tuberías (m/s)*

Material	Velocidad máxima (m/s)
Tubería revestida de hormigón simple	3,00
Tubería de hormigón centrifugado	3,50
Tubería de asbesto cemento	5,00
Tubería de PVC	5,00
Tubería de hierro fundido	5,00
Tubería acero galvanizado	5,00
Tubería de acero	5,00

Fuente: instalaciones de agua - diseño para sistemas de agua potable (NB 689)

En tuberías de impulsión la velocidad no debe ser mayor a 2 m/s, a objeto de mitigar los efectos por golpe de ariete, y en general cuando este sea inminente, se recomienda que la velocidad máxima sea menor a 1,50 m/s y la velocidad mínima en la tubería debe ser establecida en función de la velocidad de auto limpieza. La velocidad mínima recomendada es de 0,30 m/s.

### **2.1.6 Diámetros mínimos**

Los diámetros mínimos de las tuberías principales para redes cerradas deben ser:

- En poblaciones menores a 2000 habitantes 1"
- En poblaciones de 2001 a 20000 habitantes 1 ½"
- En poblaciones mayores a 20000 habitantes 2"

En redes abiertas, el diámetro mínimo de la tubería principal debe ser de 1", aceptándose, en poblaciones menores a 2000 habitantes, un diámetro de ¾" para ramales.

Para aducciones y tuberías de riego se debe considerar:

- Presión disponible.
- Velocidad de escurrimiento.
- Longitud de la línea de aducción.

La elección del diámetro debe basarse en un estudio comparativo técnico económico.

### **2.1.7 Análisis hidráulico**

El diseño hidráulico de las tuberías, pueden ser realizado por una de las siguientes fórmulas:

- Flamant
- Darcy Weisbach
- Hazen Williams
- U otros justificados técnicamente

En el dimensionamiento de las tuberías de redes abiertas deben considerarse los siguientes aspectos:

- La distribución del caudal es uniforme a lo largo de la longitud de cada tramo.
- La pérdida de carga en el ramal debe ser determinada para el caudal del tramo.
- Los caudales puntuales (escuelas, hospitales, etc.) deben ser considerados como un nudo.
- Para el cálculo de ramales debe considerarse un caudal mínimo de 0,1 l/s.

Para el dimensionamiento de las tuberías de redes cerradas se deben considerar los siguientes aspectos:

- El caudal total que llega al nudo debe ser igual al caudal que sale del mismo.
- La pérdida de carga entre 2 puntos por cualquier camino es siempre la misma.

Las mallas cerradas no deben tener anillos mayores a 1 km por lado, preferentemente las pérdidas de carga en tuberías principales y secundarias deben estar alrededor de 10 m/km y para el análisis hidráulico de una red de distribución cerrada pueden utilizarse uno de los siguientes métodos:

- Método Hardy cross
- Método de Newton – Raphson
- Método matricial
- Otros métodos equivalentes

## 2.1.8 Evolución de la modelación hidráulica

En los últimos 70 años, diferentes métodos numéricos han sido usados (y siguen empleándose) para estimar los caudales y presiones en redes de distribución de agua. Estos métodos van desde aproximaciones gráficas basadas en analogías físicas, métodos numéricos iterativos simples hasta complejas organizaciones matriciales para la resolución numérica de sistemas de ecuaciones no lineales.

Tabla 2: Síntesis histórica de formulaciones y métodos de análisis de redes malladas

Periodo	Año	Investigador/Autor (es)	Investigaciones/Formulaciones/Métodos de Análisis
<b>Periodo I</b>	1839	<i>Hagen y Poiseulle</i>	Ecuación de Pérdidas de Carga para tuberías en régimen laminar.
	1845	<i>Darcy y Weisbach</i>	Fórmula para las pérdidas de carga por fricción en un flujo a través de una tubería simple.
	1883	<i>Reynolds</i>	Definición de Número Adimensional para distinción entre flujos en régimen Laminar y Turbulento.
	1906	<i>Hazen y Williams</i>	Fórmula empírica para la pérdida de carga por fricción en el flujo a través de una tubería simple.
	1938	<i>Colebrook y White</i>	Formulación basada en trabajos de <i>Prandtl</i> y sus discípulos ( <i>Von Karman, Nikuradse y Blasius</i> ) para la determinación del factor de fricción en la fórmula de <i>Darcy</i> .
<b>Periodo II</b>	1936	<i>Hardy Cross</i>	Método de Cross con Corrección de Caudales. Técnica de Relajación elaborada por H. Cross profesor de ingeniería estructural de la Univ. de Illinois. Método originalmente desarrollado para cálculo de estructuras a porticadas de concreto extendido a Redes Malladas a Presión basado en un principio de balanceo de caudal.

	1938	<i>Cornish</i>	Modificación al Método Cross denominado originalmente <i>Balance de Cantidad</i> que posteriormente se conoció como Hardy Cross con corrección de altura.
	1950	<i>Mclroy</i>	Método de Análisis de Fluido en Redes análogo al Método Computacional Eléctrico.
<b>Periodo III</b>	>1950	N/A	Desarrollos y Pruebas con subrutinas numéricas de los primeros computadores digitales.
	1957	<i>Hoag y Weinberg</i>	Adaptación de los métodos de <i>Hardy Cross</i> para computadores digitales.
	1955 – 1965	<i>Rader y Associates y Brown y Caldwell</i>	Comercialización de Servicios de Ingeniería para cálculo de redes basado en modelos computacionales.
	>1960	<i>Datics Corporation TX</i>	Pioneros en la Venta de Software de Cálculo comercial.
<b>Periodo IV</b>	1962 - 1963	<i>Martin y Peters</i>	Método del Nodo Simultáneo. Aplicación del Método Iterativo de <i>Newton Raphson</i> a redes de distribución.
	1968	<i>Shamir y Howard</i>	Expansión del Método del Nodo Simultáneo.
	1970	<i>Fowler y Epp</i>	Método del Circuito Simultáneo.
	1970 - 1972	<i>Wood y Charles</i>	Método de la Teoría Lineal. Metodología desarrollada por <i>D.J. Wood</i> y <i>C.O.A. Charles</i> que permite resolver simultáneamente las ecuaciones de conservación de masa en nodos y conservación de energía en circuitos.
	1977	<i>Jeppson</i>	Programa comercial para el análisis de redes con base en el método del circuito simultáneo.
	1987	<i>Todini y Pilati</i>	Método del Gradiente Hidráulico. Finalmente formulado por <i>Todini y Pilati</i> . Método de manejo

			matricial de las ecuaciones de energía y conservación de masa de rápida convergencia.
<b>Periodo</b>	<b>Año</b>	<b>Investigador/Autor (es)</b>	<b>Investigaciones/Formulaciones/Métodos de Análisis</b>
<b>V</b>	1980 - 1985	IBM y Otros Fabricantes	Introducción de los primeros Computadores Personales (IBM PC o Compatibles) y nacimiento de la industria del Software Comercial para Análisis de Redes.
	1981 - 1985	Boeing Computer Services – Univ. Kentucky Civil	Lanzamiento de primeros programas comerciales de Análisis de Redes Distribución para PC como el WATSIM (Boeing Computer Serv.) y KYPIPE (Universidad de Kentucky).
	1982 - 1985	Wood y EPA	Desarrollos de los primeros modelos de calidad en estado estático.
	1985	ASCE – División Gestión de Recursos Hidráulicos	La sociedad de Ingenieros de EE.UU. en su conferencia anual realizó una serie de sesiones para evaluación de metodologías numéricas que posteriormente se llamaron “La Batalla de los Modelos”.
	1986	AWWA – U-S. EPA – Diversas Universidades	En el Simposio de Sistemas de Distribución organizado por AWWA se da una Introducción formal a los Modelos Dinámicos de Calidad de Agua.
	1987	Gessler, Sjostrom y Walski – Patrocinio USACE	Lanzamiento del software WADISO, programa de dominio público con simulaciones en periodo estático y extendido. Uno de los pioneros en incluir un módulo de optimización de diseño.

1988 - 1990	<i>Graynman, Clark y Males</i>	Desarrollo del modelo de calidad DWQM. Modelo Dinámico de calidad basado en un Método de Elementos de Volumen Discretos que se integraba y partía de los resultados generados por un modelo hidráulico.
1990 - 1993	Firmas varias de desarrollo de Software Comercial	Lanzamiento de paquetes de software con entrada amigable de datos y entornos gráficos como CyberNet, RINCAD, STONER, AQUANET, Piccolo, etc. Se destaca la integración de algunos paquetes con entornos CAD como el CyberNet de Haestad Methods.
1993	<i>Lewis Rossman – EPA</i>	EPANET 1.0, Lanzamiento al Público del Programa para el Análisis de Redes por parte de la EPA y bajo el liderazgo de <i>Rossman</i> retomando los modelos WADISO y DQM, y llevando al usuario a una interfaz gráfica en Windows. La versión 2.0 a finales de los 90 incluyó importantes modificaciones al programa original.
1998 - 2002	Centro Suizo de Desarrollo Cooperativo en Tecnologías (SKAT)	Publicación/Recopilación Técnica de los 10 programas de software más usado a nivel mundial para el análisis y diseño de sistemas de Distribución. Predecesores de los programas actualmente más populares del mercado: WaterCAD/GEMS, H2ONet/H2OMap, MikeNet, Pipe 2010, etc.
2002	Firmas varias de desarrollo de Software Comercial	Adopción del método del gradiente como algoritmo estándar de la mayoría de software, entorno gráfico en Windows, y técnicas de inteligencia artificial para Calibración Hidráulica y Diseño Optimizado.

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, el desarrollo de los modelos computacionales modernos ha estado precedido de 5 periodos históricos calificados como:

- 1) Desarrollo Fundamentos Teóricos
- 2) Era Pre-Informática
- 3) Inicio de la Era Computacional Moderna
- 4) Surgimiento de Métodos de Análisis Avanzado
- 5) Desarrollo Industria del Software Comercial.

- Desarrollo fundamentos teóricos

Claramente en el siglo XVII se dieron los primeros desarrollos teóricos y experimentales sobre mecánica de fluidos. De este siglo podemos destacar los aportes de Bernoulli (1738) quien basado en los fundamentos físicos de Newton aportó los principios básicos de conservación de energía que sirvieron de base para dispositivos como el tubo Venturi. En 1752 basado en las formulaciones teóricas de Bernoulli, Leonard Euler planteó las ecuaciones de energía en la forma que hoy conocemos y que sirven de base aún en los modelos hidráulicos actuales. En el mismo siglo, Antoine Chezy (1770) encontró que en las pérdidas del agua en movimiento la relación  $v^2/R.S$  permanecía razonablemente constante en ciertas condiciones. Relación que sirvió de base en las ecuaciones de pérdidas por fricción desarrolladas posteriormente.

En 1839 los investigadores Hagen y Poiseulle desarrollaron de manera independiente la ecuación de pérdida de carga en pequeñas tuberías bajo regímenes de flujo laminar. Este trabajo experimental derivó en ecuaciones teóricas.

Para 1845 Weisbach publica tres volúmenes de ingeniería mecánica basados en los resultados de sus experimentos. La famosa Ecuación Darcy-Weibach surge de este trabajo como una extensión a los trabajos previos de Chezy, de hecho existe una clara relación entre el coeficiente C de Chezy con el factor de fricción de la Ecuación de Darcy-Weisbach.

En 1883 los trabajos de experimentación Reynolds basados en observaciones previas de Hagen, permitieron establecer una clara distinción entre los flujos laminar y turbulento. El investigador identificó un número adimensional (posteriormente conocido como No. de Reynolds) para cuantificar la condición que permitía clasificar estos tipos de regímenes de flujo.

Entre las décadas de 1900 – 1930 se presentaron también interesantes avances. Se debe destacar el desarrollo de la teoría de capa límite que estudiaba la interacción entre los fluidos y las paredes de las tuberías, estudio liderado por Prandtl y sus estudiantes Von Karman, Nikuradse, Blasius y Stanton. Como resultado de años de investigación, se pudo demostrar experimental y teóricamente el efecto de la pared de la tubería sobre el fluido y su perfil de velocidades. Cabe destacar especialmente los experimentos de Nikuradse con partículas de arena normalizadas y mediciones de pérdidas de carga que permitieron un mejor entendimiento para el cálculo del factor de fricción en la fórmula de Darcy-Weisbach.

Mientras tanto en 1906, los investigadores Hazen y Williams desarrollaban una fórmula empírica para el cálculo de pérdida de carga en tuberías. A pesar que no tenía la misma rigurosidad teórica que la ecuación de Darcy-Weisbach, la fórmula hallada posteriormente conocida como Ec. de Hazen-Williams permitió un fácil cálculo de las pérdidas y fue ampliamente adoptada en Norte América.

Finalmente para este periodo, debemos destacar el trabajo realizado en 1938 por los investigadores Colebrook y White quienes basándose en los trabajos de Prandtl y sus discípulos, desarrollaron la Ecuación de Colebrook-White para la determinación del factor de fricción ( $f$ ) de la formulación Darcy-Weisbach en tuberías comerciales.

Como consecuencia de este trabajo en 1944 L. Moody de la Universidad de Princeton publica el diagrama de Moody, el cual esencialmente es una representación gráfica de la Ec. de Colebrook-White para el rango flujo turbulento y la Ec. Hagen-Poiseulle en el rango de flujo laminar.

- Era pre-informática

En 1936 Hardy Cross un Ingeniero Estructural de la Universidad de Illinois, desarrolló un método matemático para resolver un análisis de distribución de momentos en estructuras aporticadas. Luego Cross entendió que el método desarrollado podría también ser usado para resolver caudales y presiones en redes malladas de distribución de agua y publicó un artículo técnico con este método pionero de futuros desarrollos.

En los trabajos de Cross formulaban en esencia dos posibles metodologías:

- Balanceo de caudales en las tuberías del sistema mediante un proceso iterativo incluyendo un factor de ajuste de caudales en cada circuito.
- Resolución del valor de altura piezométrica en cada nodo del sistema bajo un proceso iterativo con un factor de ajuste para las alturas piezométricas o cargas de los nodos. Para el cálculo de pérdidas por fricción se usaba la ecuación de Hazen-Williams.

Para la primera metodología, se requiere la suposición inicial de caudales en cada tubería del sistema verificando el cumplimiento de la ecuación de conservación o continuidad en cada nodo del sistema. La implementación de la segunda metodología que tuvo la participación del investigador Cornish (1938) para su implementación, y que se conoció luego como el método Cross de Corrección de alturas en nodos, simplemente se hace una estimación inicial de los valores de gradiente hidráulico en cada nodo teniendo en cuenta que se tiene un nodo con valor de carga conocida como puede ser un tanque o reservorio.

Comparando ambos métodos, se observó que “la convergencia era lenta y no totalmente satisfactoria” cuando se empleaba el método de corrección de alturas en nodos. Esto fue atribuido a la dificultad en obtener buenas estimaciones iniciales de los valores de gradiente hidráulico en los nodos. Como resultado el método de corrección de caudales por circuito tuvo la aceptación de la comunidad de ingeniería y fue rápidamente conocido con el nombre exclusivo de “Método de Hardy Cross”. A pesar que el método fue concebido originalmente como una metodología de cálculo manual, la estructura general de la metodología lo hacía claramente un candidato para su implementación computacional. Sin embargo, tendrían que

pasar varias décadas para la llegada de implementaciones de Hardware y de Software para su completa implementación.

Para 1950 nos encontramos con el analizador de redes de distribución desarrollado por McIlroy. Este fue un método análogo al modelo computacional eléctrico, desarrollado para simular el comportamiento de un sistema de distribución de agua calculando los flujos como si fueran corriente eléctrica en lugar de agua. El analizador consideraba elementos especiales denominados “Fluistors” o Resistencias de Fluido para simular las pérdidas de carga en tubería, considerando que en la Ec. de Hazen-Williams la pérdida es proporcional al caudal elevado a 1.85 mientras en sistemas eléctricos las resistencias cumplen la ley de Ohm, en la cual la caída del voltaje varía linealmente. Este método no gozó de aceptación.

- Inicio de la era computacional

El comienzo de este periodo, se da a principios de los 50 con los primeros (básicos) modelos de análisis de redes para computadores. Con el advenimiento de los primeros equipos de cómputo y el establecimiento del lenguaje de programación FORTRAN, los investigadores comenzaron con la implementación de las metodologías conocidas de análisis para su uso en los primeros computadores digitales.

En 1957 los investigadores Hoag y Weinberg adaptaron el método de Hardy Cross para resolver redes malladas para computadores digitales y aplicaron dicho método para el sistema de distribución de la ciudad Palo Alto en California. En la presentación de su implementación se discutieron aspectos de velocidad, exactitud y la viabilidad económica de aplicar el método en un amplio espectro de simulaciones de redes.

Subsecuentemente, dos firmas americanas de ingeniería como Rader y Associates y Brown y Caldwell, emergieron como los pioneros en el uso del computador para analizar redes de distribución de agua para sus clientes. En el mismo año, la firma de informática Datics Corporation en Texas se convirtió en una de las primeras empresas en comercializar un programa comercial. La era del software comercial para análisis de redes había nacido.

Sin embargo, con la creciente sofisticación de los computadores a mediados de la década del 60, más universidades e investigadores comenzaron a cuestionar el uso del método Hardy Cross para analizar caudales y presiones en sistemas de distribución debido al reconocimiento de las siguientes limitaciones del método: i) Dependiendo del tamaño y complejidad del sistema, el método requería de muchas iteraciones para finalmente lograr la convergencia numérica y ii) el método original estaba restringido a sistemas perfectamente mallados y simples y no simulaba explícitamente el comportamiento de elementos singulares como válvulas, bombas, etc.

- Surgimiento de métodos

En respuesta a las limitaciones del Método de Cross, diferentes investigadores comenzaron a analizar nuevas formulaciones y manejos matemáticos al análisis de redes los cuales pudieran aprovechar de mejor manera las posibilidades aportadas por procesadores con cada vez mayores velocidades de cálculo. Dentro de los métodos subsecuentemente desarrollados se encontraron: 1) Método del Nodo Simultáneo, 2) Método del Circuito Simultáneo, 3) Método de Teoría Lineal y 4) Método Compuesto/Gradiente Conjugado.

En 1963 Martin y Peters fueron los primeros investigadores en publicar un algoritmo que podía usarse para resolver simultáneamente el valor de gradiente hidráulico en cada nodo del sistema de distribución. Fundamentalmente, este método representaba una solución simultánea a la metodología original de “Cross con Corrección de Alturas Piezométricas”. Posteriormente (1968) los investigadores Uri Shamir y Chuck Howard demostraron que el método podía ser usado para acomodar elementos tales como bombas y válvulas y resolver algunas otras incógnitas.

En 1969 Alvin Fowler y su asistente Robert Epp de la Universidad de British Columbia (CA) desarrollaron una nueva aproximación para el análisis de redes malladas que aplicaba el método de Newton-Raphson para simultáneamente resolver los factores de ajuste de caudal asociados con el método original de Cross (1936). Esta metodología tenía además el beneficio de hacer un manejo matricial de las ecuaciones y mejorar significativamente las características de convergencia del algoritmo original.

En 1972 los profesores Don Wood y Charles introdujeron una nueva formulación al problema del análisis de redes malladas “El Método de Teoría Lineal” en el cual la conservación de masa en los nodos y las ecuaciones de energía en cada circuito eran resueltas simultáneamente para directamente hallar el caudal en cada una de las tuberías. En cierto sentido la denominación del método como teoría lineal no es adecuada y surgió de la manera original con la cual Wood y Charles propusieron minimizar el factor de error de convergencia asociado con la solución de las ecuaciones no-lineales de energía. Posteriores desarrollos al algoritmo por parte de sus desarrolladores en programas de Software Comerciales (ej: KYPIPE, PIPE200X, PIPE2010) han realizado modificaciones significativas a la metodología inicialmente planteada.

Posteriores investigaciones como las realizadas por Roland Jeppson de la Universidad de Utah en colaboración con CH2M Hill trajeron consigo en 1976 el desarrollo de un nuevo software comercial para el análisis de redes basado en el método del “Circuito Simultáneo”. En el uso de este algoritmo, las ecuaciones no-lineales de energía para cada circuito o ruta son escritas en términos de los factores de ajuste de caudal. Así como en los métodos de “Nodo”, las ecuaciones son linealizadas usando una expansión estándar de las Series de Taylor y luego son resueltas de manera iterativa usando el método de Newton Raphson. Una vez se obtienen los factores finales de ajuste, los caudales en cada tubería pueden ser determinados por la multiplicación de dichos factores con los caudales inicialmente supuestos. Como en el método original de Cross, se requiere que la suposición inicial de caudales cumpla la ecuación de continuidad y los gradientes en los nodos se obtienen mediante la aplicación de un método de pérdidas.

Finalmente este repaso por los métodos numéricos concluye con el Método del Gradiente el cual fue propuesto en 1987 por Todini y Pilati. En esta formulación, las ecuaciones individuales de energía en cada tubería se combinan con las ecuaciones individuales de conservación en cada nodo para proveer una solución simultánea tanto de cargas en los nodos como caudales individuales en las tuberías. Similar a lo realizado en los métodos “Circuito Simultáneo” y “Teoría Lineal”, las ecuaciones no lineales de energía son linealizadas usando la expansión en series de Taylor. Sin embargo, a diferencia de métodos predecesores en este caso las ecuaciones son resueltas usando un eficiente esquema que emplea la inversión de la

matriz de coeficientes originales. Un aspecto por destacar del método es el trabajo con matrices de manera dispersa, lo que permite a reducción de la memoria requerida y el tiempo de cálculo en computadores.

Este método ha sido actualmente adoptado por la mayoría de programas de softwares comerciales del mercado.

- La industria del software comercial para el análisis de sistemas de distribución.

Como se ha descrito previamente a finales de los 60 y durante la década de los 70 se tuvo un periodo de gran fertilidad en el desarrollo y ajuste de diversos algoritmos para la solución de redes malladas de distribución. Investigadores y Universidades a nivel mundial expusieron sus trabajos y presentando las ventajas de implementación y/o velocidad de convergencia de sus metodologías.

A principios de los 80's muchos de estos programas de "Investigación Académica" (ej: Fowler, Jepsen, Sharmir y Howard, Wood, etc.) fueron paulatinamente convertidos en aplicaciones comerciales de software que fueron promocionados y mercadeados a través de Universidades y/o a través de empresa medianas e inclusive grandes corporaciones. Esto en paralelo con la introducción del computador personal al público en general que a partir de 1981 surgió con el éxito del IBM PC o compatible que hizo posible el llevar las metodologías de análisis a equipos de escritorio.

Dentro de las primeras aplicaciones más importantes de la industria se destaca la entrada al mercado a partir de 1982 de WATSIM desarrollado por Boeing Computer Services y de KYPIPE por parte de la Universidad de Kentucky capitalizando la investigación de una década del Centro de Desarrollo de Software de la facultad de ingeniería de dicha universidad.

A medida que avanzaban los 80's aparecieron las aplicaciones lanzadas por firmas norteamericanas e internacionales como Expert Development Corporation (WATSYS), WRC (WATNET), Charles Howard y Associates (SPP8), y SAFEGE Consulting

Engineers (Piccolo) emergieron como los proveedores de servicios integrales de modelación para varias empresas de Agua alrededor del mundo.

Los modelos entonces empezaron a extenderse a sistemas de mayor complejidad hidráulica (Bombas, Válvulas de Control, Simulación en Periodo Extendido, Calidad del Agua) y en ese momento agencias gubernamentales como el USACE y la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU (U.S. EPA) también desarrollaron sus propias aplicaciones.

En 1987 se lanza el programa de dominio público WADISO desarrollado para una unidad experimental del USACE por los investigadores Gessler, Sjostrom y Walski. Dicho modelo basado en la metodología de Nodo Simultáneo contenía simulaciones de la red tanto en periodo estático como periodo extendido. Se trataba de un programa que permitía una entrada de datos interactiva vía teclado y permitía la inclusión de los diferentes elementos de una red como Bombas, Válvulas de Retención, Válvulas Reductoras de Presión, Múltiples fuentes, Patrones de consumo, etc. Una de las grandes novedades del software es la inclusión de un módulo de Diseño Optimización que permitía dimensionar las redes tanto para sistemas existentes como zonas de expansión.

Para mediados de 1992 sale al mercado la primera versión del software CyberNET. Este software lanzado por la casa matriz Haestad Methods (Hoy Bentley Systems) con base en Connecticut, incluyó como gran novedad la integración del modelo hidráulico en un entorno CAD.

En 1993 se lanza la primera versión al público del Software EPANET desarrollado por un grupo de trabajo liderado por Lewis Rossman. La primera versión de EPANET se basó en dos modelos de uso público mencionados anteriormente: WADISO (Simulación Hidráulica) y DWQM (Modelación Dinámica de Calidad). En ambos casos estos modelos estaban escritos en FORTRAN, y el equipo de Rossman los convirtió en lenguaje de programación C que para su época era un lenguaje de última generación. Como gran innovación se presentaba el uso de un programa en entorno gráfico de Windows, que brindaba al usuario un software de código abierto con una interfaz muy amigable que fue rápidamente adoptado por investigadores y la comunidad de ingeniería.

Es importante anotar que EPANET sufrió cambios significativos hasta el lanzamiento de la versión EPANET 2.0 a finales de la década (1998 – 2000), estos cambios no solamente tuvieron que ver con mejoras a la interfaz gráfica y herramientas de entrada de datos sino también con sus métodos de cálculo y algoritmos. En primer lugar en lo que tiene que ver con el método de análisis hidráulico se adaptó el método de gradiente conjugado (con el objeto de mejorar la velocidad de convergencia y uso de memoria). En lo que tiene que ver con el modelo dinámico de calidad también se reemplazó la aproximación Euleriana por una aproximación o método Lagrangiana, quien según un análisis comparativo realizado por Boulos y el mismo Rossman demostró ser más versátil y eficiente.

## **2.2 Propiedades de los fluidos**

Se enunciarán una serie de propiedades fundamentales de los fluidos. Entenderlas estas propiedades es esencial para la aplicación de los principios básicos de la mecánica de fluidos a la solución de problemas prácticos de ingeniería hidráulica.

### **2.2.1 Distinción entre un sólido y un fluido**

Las moléculas de un sólido suelen estar más próximas entre sí que las de un fluido. Las fuerzas de atracción entre las moléculas de un sólido son tan grandes que este tiende a mantener su forma. Este no es el caso de los fluidos, donde la fuerza de atracción entre las moléculas es más pequeña. Un sólido elástico ideal se deformará al aplicar una carga y volverá a su estado inicial cuando se deje de aplicar. Algunos sólidos son plásticos. Estos se deformarán al aplicar una carga suficiente y seguirán deformándose mientras se aplica la carga, siempre y cuando no se produzca la ruptura del material. La deformación no continuará cuando se quita la carga, pero el sólido plástico no volverá a su estado inicial.

Las fuerzas de cohesión intermoleculares en un fluido son insuficientes para mantener unidos los diversos elementos del fluido. Por tanto un fluido bajo la aplicación del esfuerzo más mínimo fluirá y seguirá fluyendo mientras esté presente.

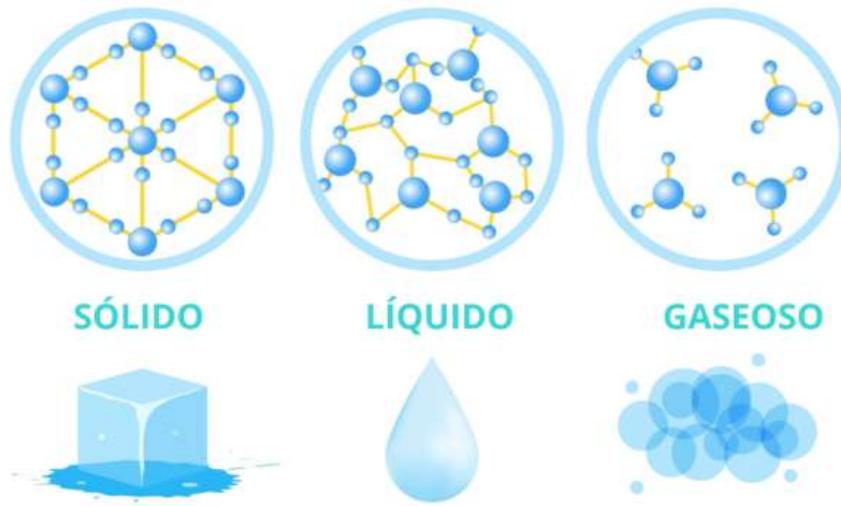


Figura 6: Esquematación estados de la materia

Fuente: <https://www.caracteristicas.co/estados-solido-liquido-gaseoso/>

### 2.2.2 Densidad y peso específico

La densidad de un fluido es su masa por unidad de volumen, mientras que el peso específico es su peso por unidad de volumen, en el sistema de unidades internacionales la densidad se expresa en kilogramos por metro cúbico, el peso específico representa la fuerza ejercida por la gravedad sobre una unidad de volumen de fluido, y por tanto se tiene que expresar con las unidades de fuerza por unidad de volumen como son los newtons por metro cúbico. Se ha de notar que la densidad es una cantidad absoluta, debido a que depende de la masa, que es independiente de la posición. En cambio el peso específico no es una cantidad absoluta ya que depende del valor de la aceleración gravitacional la cual varía con la posición principalmente latitud y elevación por encima del nivel del mar.

Las densidades y los pesos específicos de los fluidos varían con la temperatura.

Densidad:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Donde:

$\rho$ = densidad (kg/m<sup>3</sup>)

m= masa del fluido (kg)

V=volumen del fluido (m<sup>3</sup>)

Peso específico:  $\gamma = \frac{mg}{V}$

Donde:

$\gamma$ = peso específico (N/m<sup>3</sup>)

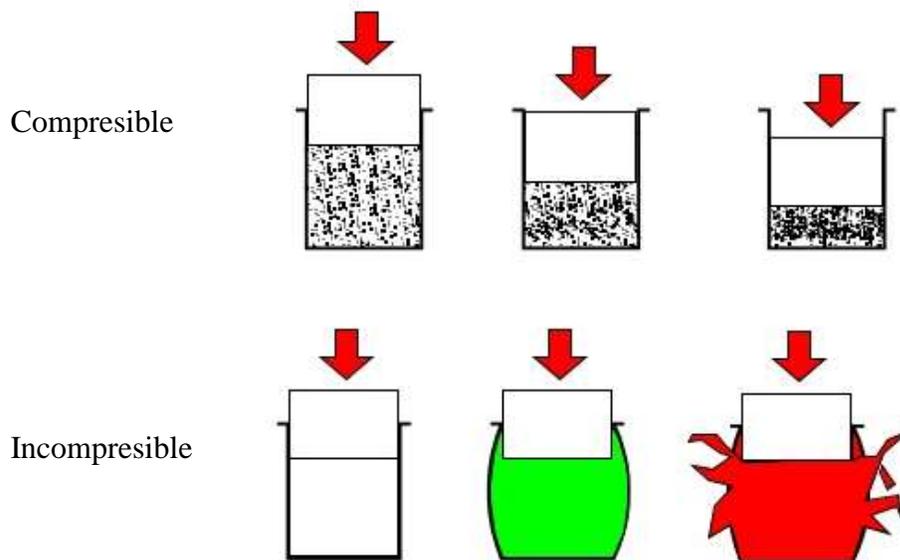
m= masa del fluido (kg)

g= aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

V=volumen del fluido (m<sup>3</sup>)

### 2.2.3 Fluidos compresibles e incompresibles

La mecánica de fluidos trata tanto de los fluidos compresibles como de los fluidos incompresibles, es decir, de fluidos de densidad variable o densidad constante. Aunque no existe en la realidad un fluido incompresible, este término se aplica en los casos donde el cambio de la densidad con la presión es despreciable. Este suele ser el caso de los líquidos. Los gases también pueden considerarse como incompresibles cuando la variación de la presión es pequeña en comparación con la presión absoluta.



*Figura 7: Fluidos compresibles e incompresibles*  
 Fuente: <https://www.caracteristicas.co/estados-solido-liquido-gaseoso>

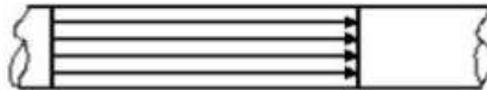
#### 2.2.4 Fluido ideal

Un fluido ideal se puede definir como un fluido en el que no existe fricción, es no viscoso (es decir, su viscosidad es cero). Por tanto las fuerzas internas en cualquier sección dentro del mismo son siempre normales a la sección.

Aunque no existe tal fluido en la práctica, muchos fluidos se aproximan al flujo sin fricción a una distancia razonable de los contornos sólidos, por lo que sus comportamientos muchas veces se puede analizar suponiendo las propiedades de un fluido ideal.

En un fluido real, ya sea líquido o gas, se generan fuerzas tangenciales o cortantes siempre que se produzca movimiento relativo a un cuerpo, dando lugar a la fricción en el fluido, porque estas fuerzas oponen el movimiento de una partícula respecto a otra. Estas fuerzas de fricción dan lugar a una propiedad del fluido denominada viscosidad.

Fluido ideal



Fluido real



*Figura 8: Tipos de fluidos*

Fuente: Elaboración propia

### 2.2.5 Viscosidad

La viscosidad de un fluido es una medida de su resistencia a la deformación cortante o angular. Las fuerzas de fricción en un fluido en movimiento son el resultado de la cohesión y del intercambio de la cantidad de movimiento entre moléculas. Al aumentarse la temperatura, la viscosidad de todo líquido disminuye, mientras que la viscosidad de todo gas aumenta. Esto se debe a las fuerzas de cohesión, que disminuyen con la temperatura. Por tanto cuando una partícula veloz de fluido entra en una capa de menor velocidad tiende a acelerarla, de manera semejante cuando una partícula lenta de fluido entra en una capa más veloz tiende a frenarla, este intercambio molecular da lugar a una fuerza de cortadura o produce una fuerza de fricción entre capas adyacentes de fluido.

En muchos problemas relacionados con la viscosidad, esta aparece dividida por la densidad, esta relación se conoce como viscosidad cinemática así denominada por que la fuerza no está involucrada en las dimensiones, quedando únicamente la longitud y el tiempo, como en cinemática.

$$\bar{\nu} = \frac{\mu}{\rho}$$

Donde:

$\bar{\nu}$ = viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s)

$\mu$ = viscosidad

$\rho$ =densidad

La viscosidad cinemática se mide habitualmente en  $m^2/s$  en el sistema internacional, y en  $ft^2/s$  en el sistema británico de unidades.

*Tabla 3: Viscosidad cinemática de algunos líquidos*

Viscosidad cinemática de algunos líquidos industriales		
Líquido	T(°C)	$\nu \cdot 10^{-4}$ ( $m^2/s$ )
Gasolina corriente	18	0.0065
Agua dulce	20	0.0101
Alcohol sin agua	18	0.0133
Mercurio	20	0.0157
Petróleo ligero	18	0.2500
Petróleo pesado	18	1.4000
Aceite lubricante	20	1.7200

Fuente: <https://www.slideshare.net/fluidos-iviscosidad>

## 2.3 Cinemática de los fluidos

Parte de la mecánica de los fluidos que estudia el movimiento de un fluido sin tener en cuenta las fuerzas que lo producen ni considerar las condiciones energéticas del mismo, estos pueden fluir bajo presión o por efectos de la gravedad, en nuestro análisis se observará el flujo a presión.

### 2.3.1 Criterio del número de Reynolds

En el flujo de un fluido a través de un conducto completamente lleno, la gravedad no afecta a la configuración del flujo. Además, como no hay superficies libres del líquido, es obvio que la capilaridad no tiene importancia práctica. Por tanto, las fuerzas significativas son la inercia y la fricción del fluido debido a la viscosidad.

Considerando la relación de fuerzas de inercia y fuerzas viscosas, el parámetro obtenido se denomina el Número de Reynold, o  $Re$ , en honor de Osborne Reynolds (1842-1912), el físico y profesor inglés que lo presentó en una publicación de su trabajo experimental en 1882.

Osborne Reynolds en los años 1880 después de experimentos exhaustivos en fluidos descubrió y clasificó en 3 tipos de régimen de flujo y planteó la siguiente ecuación y enunció que el tipo de flujo depende del valor de la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas, es decir, el número de Reynolds:

$$Re = \frac{vD}{\bar{v}}$$

Donde:

Re= Número de Reynolds (adimensional)

v= velocidad (m/s)

D= diámetro interior de la tubería (m)

$\mu$ = viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s)

Reynolds clasifica el flujo en 3 regímenes los cuales son:

- Flujo laminar

Cuando el gradiente de velocidad es bajo, la fuerza de inercia es mayor que la de fricción, las partículas se desplazan pero no rotan. El resultado final es un movimiento en el que las partículas siguen trayectorias más o menos rectas y definidas. Este tipo de movimiento fue identificado por Reynolds y le llamó régimen “laminar”.

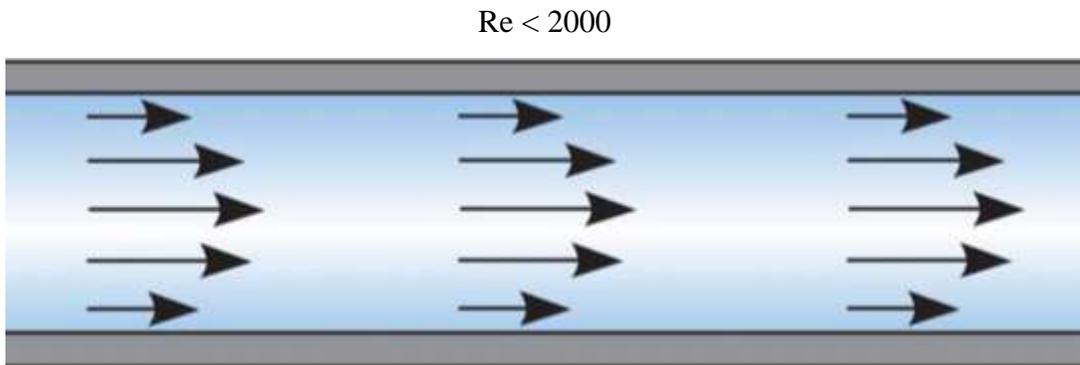


Figura 9: Esquema régimen laminar

Fuente: <https://fisica.laguia2000.com/dinamica-clasica/flujo-laminar-y-flujo-turbulento>

- Flujo en transición

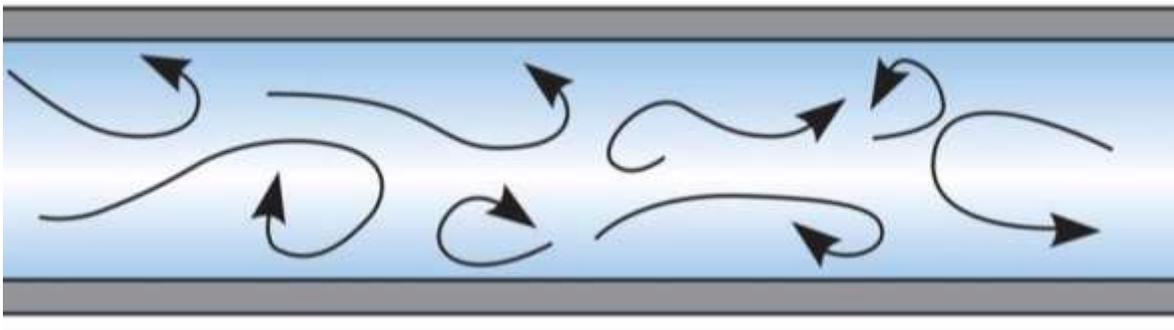
Se dice que es un flujo en transición cuando influyen simultáneamente el número de Reynolds y la rugosidad.

$$2000 < Re < 4000$$

- Flujo turbulento

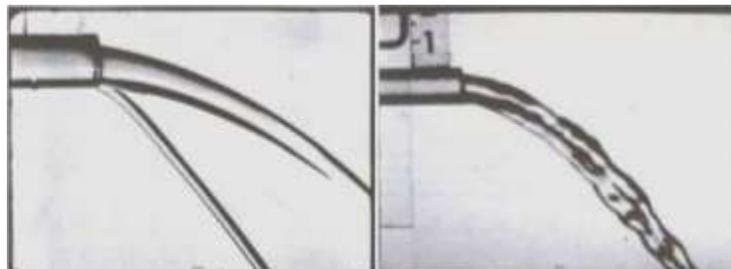
Al aumentar el gradiente de velocidad se incrementa la fricción y estas adquieren una rotación “apreciable”, la viscosidad pierde su efecto y las partículas siguen trayectorias erráticas, y sin rumbo fijo. A este tipo de movimiento se le llama “turbulento”.

$$Re > 4000$$



*Figura 10: Esquema régimen turbulento*

Fuente: <https://fisica.laguia2000.com/dinamica-clasica/flujo-laminar-y-flujo-turbulento>



*Figura 11: Diferencia de ambos regímenes*

Fuente: Saldarriaga J., Hidráulica de Tuberías, 1998

Si la pérdida de carga en una longitud dada de tubería uniforme se mide a distintas velocidades, se observara que, siempre que la velocidad sea lo suficientemente baja como para garantizar flujo laminar la pérdida de carga debida a la fricción será directamente proporcional a la velocidad como se representan en la Figura 12. No obstante, al incrementar la velocidad en algún punto B, donde la observación visual de un tinte inyectado dentro de un tubo transparente muestra que el flujo cambia de laminar a turbulento se producirá un aumento brusco del ritmo al que varía la pérdida de carga.

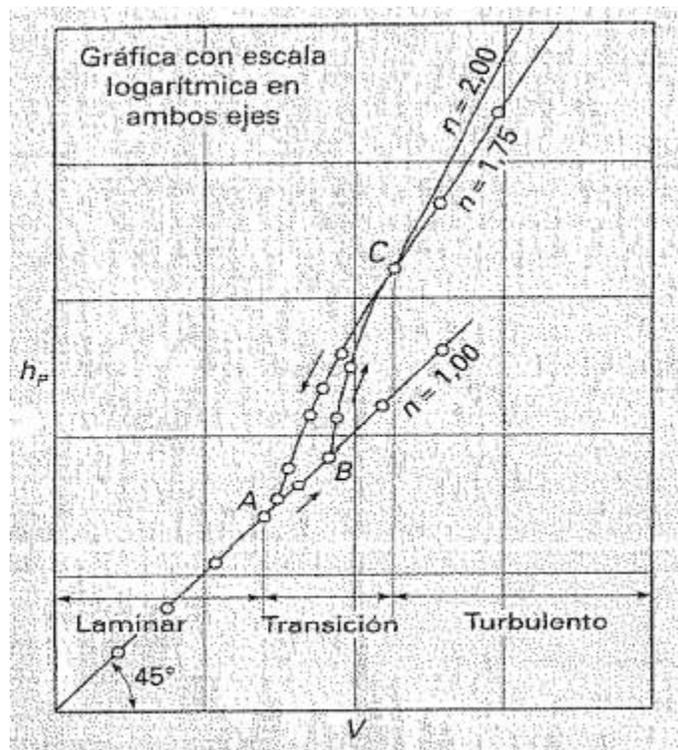


Figura 12: Figura con escala logarítmica  $H_f$  vs  $V$   
 Fuente: Joseph Franzini y John Finnemore, Mecánica de fluidos, 1997

### 2.3.2 Pérdidas en tuberías

La pérdida de carga en tuberías es la pérdida de presión de un fluido al producirse fricción entre las partículas del fluido y las paredes del conductor, y por obstáculos en la conducción.

Tanto en sistemas de agua como en sistemas de otro tipo de fluido, el fluido pierde energía por el rozamiento continuo con la tubería y por la fricción que ocurre en el paso de accesorios o dispositivos, que serán vistos como obstáculos en la conducción. Los obstáculos pueden

ser, la propia tubería, válvulas, derivaciones, codos, manguitos, estrechamientos, cambios de dirección, cambios de sección, etc. Es decir, nos referimos a todo obstáculo que modifica la energía del propio fluido.

### 2.3.2.1 Pérdida de carga continua

También llamadas pérdidas de carga por fricción, Son las que ocurren por los rozamientos del fluido con las tuberías y dependen de parámetros como longitud y rugosidad de la tubería, y la velocidad, viscosidad o densidad del fluido, estas pérdidas serán las que analizaremos.

### 2.3.2.2 Pérdidas de carga singulares

Las pérdidas debidas a las perturbaciones locales del flujo en conductos como los cambios de la sección transversal, juntas de estanqueidad salientes, codos, válvulas y elementos similares se denominan pérdidas menores o pérdidas locales. En el caso de una tubería o canal muy largo, estas pérdidas suelen ser insignificantes en comparación con la fricción fluida en la longitud de la tubería es muy corta, estas pérdidas locales pueden llegar a ser las pérdidas principales en el caso del tubo de succión de una bomba, la pérdida de carga en la entrada, sobre todo si se instala un filtro y una válvula de compuerta, puede ser mucho mayor que la pérdida por fricción en el corto tubo de entrada.

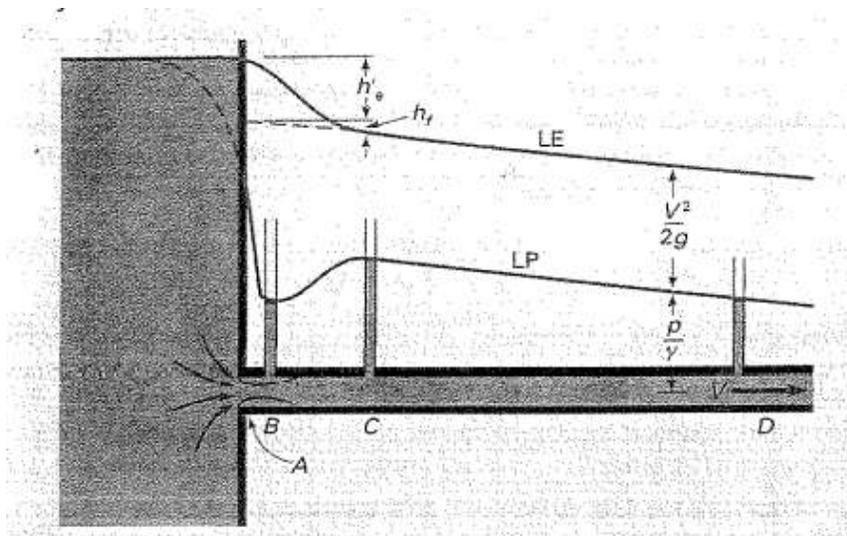


Figura 13: Pérdida por entrada

Fuente: Joseph Franzini y John Finnemore, Mecánica de fluidos, 1997

Tales pérdidas se las representa con la siguiente ecuación:

$$h_a = K \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

$h_a$ = pérdida de carga singulares o localizadas (m.c.a.)

K= coeficiente empírico (m)

v= velocidad media del agua (m/s)

g= aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

### 2.3.2.3 Pérdidas de carga por fricción

A continuación se va a intentar desglosar con mayor detalle el término “pérdida de carga”, que tendrá una importancia fundamental a lo largo de este estudio.

Las pérdidas lineales son las producidas por las tensiones viscosas originadas por la interacción entre el fluido y las paredes de una tubería o conducto. Es decir, al moverse el fluido por el interior de la tubería, existe una fuerza de rozamiento que provoca una cierta pérdida de energía, es decir, que una partícula se mueve mucho más rápido que la otra, se desarrollan fuerzas de fricción que actúan tangencialmente a las mismas. Estas fuerzas de fricción tratan de introducir rotación entre las partículas en movimiento, pero al mismo tiempo, la viscosidad trata de impedir dicha rotación.

Por lo anterior, en el diseño y análisis de conducciones de agua a presión, es indispensable conocer la relación que existe entre las pérdidas de energía como función del fluido, la velocidad, el diámetro y el tipo de material en cada una de las tuberías, para poder cumplir y verificar los requerimientos. Por ello, a lo largo de la historia se han planteado diversas ecuaciones para tal fin. Estas se pueden clasificar en dos familias: las teóricas y las empíricas. La ecuación más reconocida de la primera familia es la ecuación de Darcy (1803-1871)-Weisbach (1806-1871). Por otro lado, la Ecuación de Hazen-Williams es una de las ecuaciones empíricas más exitosas (desarrollada en 1906), debido a que es explícita en relación con la velocidad y presenta ventajas de aplicabilidad en el diseño de tuberías con

respecto a las ecuaciones teóricas. Teniendo en cuenta lo anterior, a continuación se presentará una breve reseña histórica sobre el desarrollo de cada una de estas ecuaciones y el efecto del uso de las mismas.

#### 2.3.2.4 Darcy – Weisbach

Esta ecuación fue deducida por Henry Darcy, ingeniero francés del siglo XIX, y por Julius Weisbach, científico e ingeniero alemán de la misma época. Weisbach propuso el uso del coeficiente adimensional ( $f$ ) y Darcy llevó a cabo numerosos experimentos en tuberías con flujo de agua. Por esta razón, la ecuación se conoce como la ecuación de Darcy-Weisbach.

La ecuación de Darcy-Weisbach es una ecuación ampliamente usada en hidráulica. Permite el cálculo de la pérdida de carga debida a la fricción dentro una tubería llena.

Esta expresión es aplicable tanto al flujo laminar como al flujo turbulento y a cualquier forma de sección transversal.

Considerando el flujo en un conducto de sección transversal uniforme “A”, no necesariamente circular (Figura 14). Las presiones en las secciones 1 y 2 son  $p_1$  y  $p_2$ , respectivamente. La distancia entre las secciones es  $L$ . para que exista equilibrio en un flujo estacionario, la suma de las fuerzas que actúan sobre cualquier elemento del fluido debe ser igual a 0 (es decir:  $\Sigma F = m \cdot a = 0$ ). Por tanto, en la dirección del flujo.

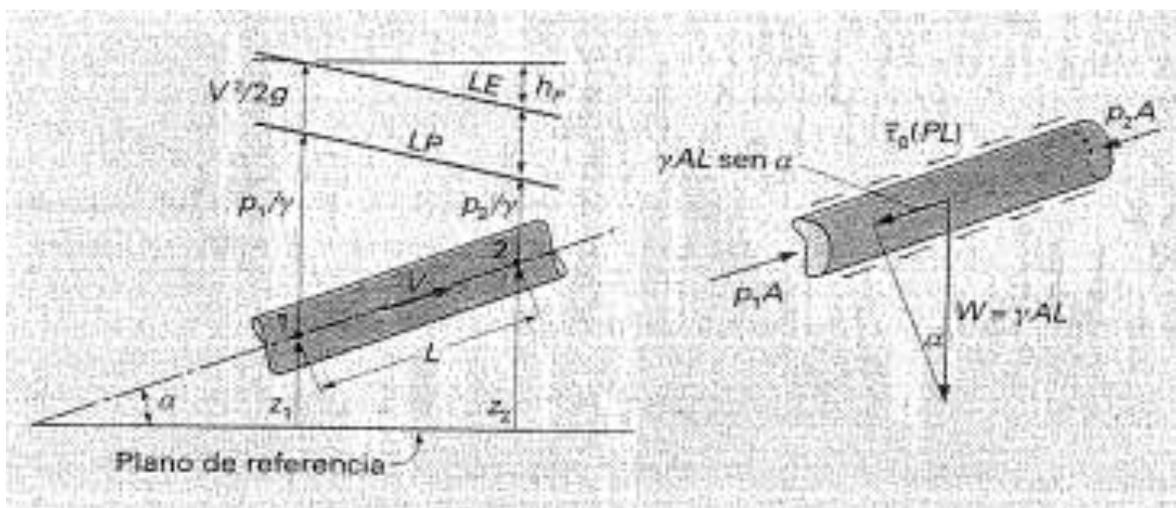


Figura 14: Flujo en un conducto

Fuente: Joseph Franzini y John Finnemore, Mecánica de fluidos, 1997

$$P_1A - P_2A - yLA \sin \alpha - T_O(PL) = 0$$

Donde  $T_O$  es el esfuerzo cortante local que actúa sobre una porción diferencial  $dP$  del perímetro mojado.

Teniendo en cuenta que  $\sin \alpha = (Z_2 - Z_1)/L$  y dividiendo cada término en la ecuación anterior obtenemos:

$$\frac{P_1}{y} - \frac{P_2}{y} - Z_2 + Z_1 = T_O \frac{PL}{yA}$$

En el dibujo izquierdo de la Figura 14 se puede ver que

$$H_f = \left(Z_1 + \frac{P_1}{y}\right) - \left(Z_2 + \frac{P_2}{y}\right)$$

Por tanto, reemplazando el lado izquierdo de la ecuación anterior por  $H_f$  y reemplazando  $A/P$  en el lado derecho por  $R_h$  obtenemos:

$$H_f = T_O \frac{L}{R_h y}$$

Esta ecuación es aplicable a cualquier forma de una sección transversal uniformé, independientemente de si el flujo es laminar o turbulento.

Para un conducto de pared lisa, donde la rugosidad de la pared se puede despreciar, se podría suponer que el esfuerzo cortante fluido medio  $T_O$  en la pared es una función de la densidad, viscosidad cinemática, velocidad y alguna dimensión lineal característica, que aquí se tomara como el radio hidráulico  $R_h$ , por tanto. Utilizando el teorema pi ( $\pi$ ) del análisis dimensional para determinar mejor la forma de esta relación elegimos densidad, radio hidráulico y velocidad como variables primarias, por lo que

$$\pi_1 = \mu \rho^{a_1} R_h^{b_1} V^{c_1}$$

$$\pi_2 = T_O \rho^{a_2} R_h^{b_2} V^{c_2}$$

Como las dimensiones de las variables son  $ML^{-1} T^{-1}$  para  $\mu$ ,  $ML^{-1} T^{-2}$  para  $T_O$ ,  $ML^{-3}$  para  $\rho$ ,  $L$  para  $R_h$ , y  $LT^{-1}$  para  $V$ , las dimensiones para  $\pi_1$  serán:

$$\text{Para } M: 0 = 1 + a_1$$

$$\text{Para } L: 0 = -1 - 3a_1 + b_1 + c_1$$

Para T:  $0 = -1 - c_1$

La solución de estas 3 ecuaciones simultáneas es  $a_1 = b_1 = c_1 = -1$ , de donde:

$$\Pi_1 = \frac{\mu}{\rho R_h V} = Re^{-1}$$

Donde  $R_h V \rho/\mu$  es un número de Reynolds con  $R_h$  como la longitud característica, de manera similar obtenemos:

$$\Pi_2 = \frac{T_o}{\rho V^2}$$

Podemos decir que  $\Pi_2 = \phi(\Pi_1^{-1})$

Lo que nos da  $T_o = \rho V^2 \phi(Re)$

Poniendo el termino adimensional  $\phi(Re) = 0,5 C_f$

Se deduce que:

$$T_o = C_f \rho V^2 / 2$$

Sustituyendo el valor de  $T_o$  en la ecuación  $H_f = T_o \frac{L}{R_h y}$

Tenemos  $H_f = C_f \frac{L V^2}{R_h 2g}$

Si reemplazamos  $f = 4C_f = 8\phi(Re)$

$$H_f = f \frac{L v^2}{D 2g}$$

Que se puede aplicar a una sección transversal de cualquier forma geométrica.

Esta fórmula permite la evaluación apropiada del efecto de cada uno de los factores que inciden en la pérdida de energía en una tubería. Es una de las pocas expresiones que agrupan estos factores. La ventaja de ésta fórmula es que puede aplicarse a todos los tipos de flujo hidráulico (laminar, transicional y turbulento), debiendo el coeficiente de fricción tomar los valores adecuados, según corresponda

$$\Delta P = f * \frac{L v^2}{D 2g}$$

Donde:

$\Delta P$ = Pérdida de carga por fricción (m.c.a.)

$f$ = Coeficiente de fricción (parámetro adimensional)

$L$ = Longitud del tubo (m)

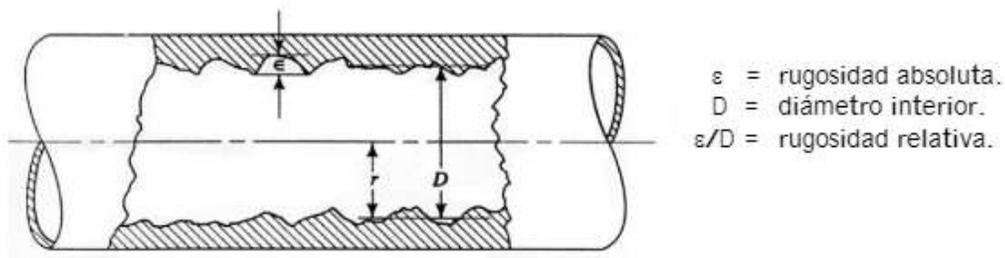
$D$ = Diámetro interior del tubo (m)

$v$ = Velocidad media de circulación (m/s)

$g$ = Aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

Cuando el régimen es laminar, la pérdida de carga tiene lugar entre las capas del líquido y no entre éste y la pared, donde la velocidad relativa es nula. Cuando el régimen es turbulento, la capa en contacto con la pared, con velocidad relativa nula, se hace más fina, y las irregularidades de la pared afectan a partículas del líquido con mayor velocidad. En este caso la rugosidad de la pared tiene un efecto decisivo, más importante cuando mayor sea el número de Reynolds. Dicho de otra forma, las pérdidas de carga a lo largo de un conducto dependen de:

- La rugosidad del conducto.



*Figura 15: Esquema rugosidad relativa*

Fuente: <https://docplayer.es/20641115-Determinacion-de-las-perdidas-de-carga.html>

- La velocidad a la que se esté moviendo el fluido.
- Las propiedades físicas del fluido, es decir, de la densidad y la viscosidad, y por lo tanto, también de su temperatura.

Es decir a un mayor número de Reynolds, el flujo se tornara más desordenado generando un factor de fricción (f) mayor y por lo tanto generando mayores pérdidas por fricción al tramo, este parámetro f es adimensional y se denomina factor de fricción o factor de Darcy que en general es función del número de Reynolds, este factor de fricción puede ser obtenido de manera gráfica a través del ábaco de Moody, sin embargo los errores que se pueden cometer utilizando este método son mayores debido a que la obtención de un punto gráficamente siempre introduce un error y debido a que el ábaco de Moody está representado en escala logarítmica, por lo que el error al tomar un punto es aún mayor que si se utilizase una escala decimal. Moody pudo producir un ábaco en la cual incluía todo el rango de flujo, desde laminar hasta turbulento hidráulicamente rugoso, con el fin de estudiar el comportamiento del factor de fricción (f) para tuberías comerciales. Esta gráfica Figura 16 se conoce como el diagrama de Moody. Durante mucho tiempo fue la única herramienta práctica para el cálculo del factor de fricción que debía utilizarse en conjunto con la ecuación de Darcy-Weisbach, ya que las ecuaciones matemáticamente deducidas resultaron ser tan complejas que requirieron métodos numéricos para su solución. En la época anterior a la masificación del uso de computadores y calculadoras programables, el tener que utilizar métodos iterativos para el diseño de tuberías resultaba engorroso y poco práctico.

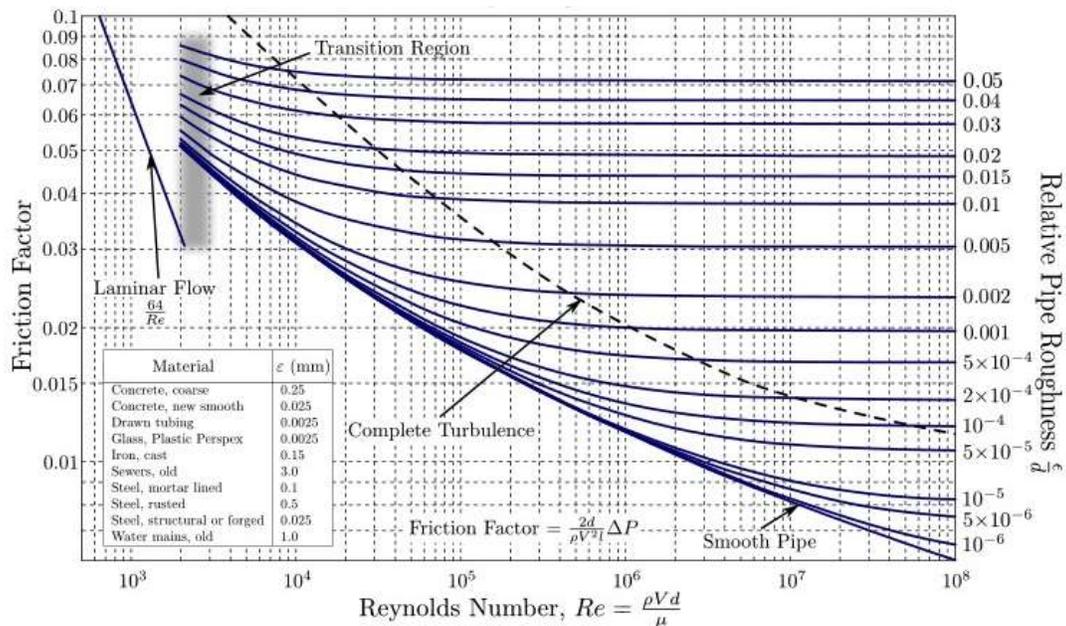


Figura 16: Ábaco de Moody  
Fuente: <https://www.lifeder.com/diagrama-moody/>

Para la determinación del factor de fricción utilizaremos 2 ecuaciones, una para flujo laminar y otra para flujo turbulento:

- Hagen-Poiseuille, Hagen un ingeniero alemán realizó experimentos con agua que fluía por tubos pequeños de latón, publicando sus resultados en el año 1839, Poiseuille un ingeniero francés realizó experimentos con agua que fluía por tubos capilares, para determinar las leyes de flujo de la sangre por las venas del cuerpo, publicando sus estudios en el año 1840, afirman que la pérdida de carga en un flujo laminar es directamente proporcional a la velocidad. Esto se puede verificar experimentalmente como se muestra en la figura 16. La característica más impactante de esta ecuación es que no implica ningún coeficiente empírico ni tampoco factores experimentales de ningún tipo, salvo las propiedades físicas del fluido como la viscosidad y la densidad, se deduce que la fricción es independiente de la rugosidad de la pared de la tubería en el flujo laminar. La validez de esto se ha comprobado experimentalmente. El análisis dimensional muestra que la pérdida por fricción se puede expresar con la ecuación.

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

Donde:

f= Coeficiente de fricción de Darcy (adimensional)

Re= Número de Reynolds (adimensional)

- Prandtl desarrollo una ecuación para determinar el coeficiente de fricción en tubería lisa.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log\left(\frac{Re\sqrt{f}}{2,51}\right)$$

Donde:

f= Coeficiente de fricción de Darcy (adimensional)

Re= Número de Reynolds (adimensional)

Esta ecuación es aplicable al flujo turbulento, el flujo se denomina flujo de tubería hidráulicamente lisa.

Con números de Reynolds altos las rugosidades atraviesan la subcapa viscosa y se ha observado que la tubería se comporta como una tubería completamente rugosa, es decir, su coeficiente de fricción es independiente del número de Reynolds, para tal caso Karman halló que el coeficiente de fricción se podría expresar como:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log\left(\frac{3,7}{\epsilon/D}\right)$$

Donde:

f= Coeficiente de fricción de Darcy (adimensional)

Re= Número de Reynolds (adimensional)

$\epsilon$ = Rugosidad absoluta (mm.)

Los valores de f de esta ecuación corresponden al lado derecho del diagrama de Moody donde las curvas se convierten en horizontales, a estos valores los denominan  $f_{\min}$ .

En 1939 Colebrook combinó las ecuaciones anteriores para obtener la ecuación de flujo turbulento para todas las tuberías:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log\left(\frac{\epsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}}\right)$$

Donde:

f= Coeficiente de fricción de Darcy (adimensional)

Re= Número de Reynolds (adimensional)

$\epsilon$ = Rugosidad absoluta (mm.)

D= Diámetro (mm)

Por lo tanto, para determinar este factor de fricción utilizamos la correlación de Hagen - Poiseuille para flujo laminar y la correlación de Colebrook - White para flujo turbulento, estas ecuaciones probaron ser válidas para determinar el factor de fricción (f) en tuberías, sin embargo, tiene el problema de que no es una ecuación explícita para el factor de fricción (f), lo cual implica la necesidad de utilizar algún método numérico para calcularlo.

- Flujo laminar  $f = \frac{64}{Re}$
- Flujo turbulento  $\frac{1}{f^{0.5}} = -2\log\left(\frac{e/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re * f^{0.5}}\right)$

Este problema matemático ocasionó la aparición de ecuaciones empíricas más sencillas de utilizar, entre estas, la más famosa es la ecuación de Hazen y Williams.

### 2.3.4 Hazen – Williams

Una de las ecuaciones empíricas, independientes del análisis de Darcy, más exitosas fue la de Hazen y Williams (desarrollada en 1933). La forma original de esta ecuación, planteada en unidades del sistema internacional, era la siguiente:

$$V=0.849 C_{hw} * R^{0.83} * S^{0.54}$$

Donde:

v= Velocidad media de la tubería (m/s)

R= Radio hidráulico en (m)

S= Pérdida de energía por unidad de peso por unidad de longitud (m/m)

C<sub>hw</sub>= Coeficiente de rugosidad de la tubería (adimensional)

El coeficiente de rugosidad de la ecuación se conoce como el coeficiente de Hazen-Williams, la ecuación de Hazen-Williams tiene la ventaja de ser explícita para la velocidad y, por consiguiente, para el caudal.

La ecuación de Hazen-Williams, es una fórmula empírica (es decir, una correlación puramente experimental), que se utiliza para calcular la pérdida de carga en una tubería. Esta ecuación se limita por usarse solamente para agua como fluido de estudio, mientras que encuentra ventaja por solo asociar su coeficiente a la rugosidad relativa de la tubería que lo conduce, o lo que es lo mismo al material de la misma y el tiempo que este lleva de uso como se puede ver, es bastante más sencilla que la ecuación de Darcy-Weisbach, si realizando algunos reemplazos en la ecuación.

Sabemos que:  $S = \frac{h_f}{L}$

Por lo tanto: 
$$V = 0.849 C_{hw} * R^{0.83} * \left(\frac{h_f}{L}\right)^{0.54}$$

Despejando  $H_f$  
$$h_f^{0.54} = \frac{V * L^{0.54}}{0.85 * C_{hw} * R^{0.63}}$$

Sabemos que: 
$$V = \frac{Q}{A} \quad Y \quad R = \frac{D}{4}$$

Reemplazando en  $H_f$  
$$h_f = 10.67 * \left(\frac{Q}{C_{hw}}\right)^{1.852} * \frac{L}{D^{4.87}}$$

Donde:

$h_f$ = Pérdida de carga por fricción (m.c.a.)

$C$ = Coeficiente de fricción (adimensional)

$L$ = Longitud del tubo (m)

$D$ = Diámetro interior del tubo (m)

$Q$ = Caudal en el interior del tubo (m<sup>3</sup>/s)

Esta última ecuación es explícita para las pérdidas por fricción. En esa característica radica la gran ventaja de la ecuación de Hazen-Williams sobre la ecuación de Darcy-Weisbach utilizada conjuntamente con la ecuación de Colebrook-White. Dicha ventaja hizo que el uso de la ecuación de Hazen-Williams se popularizara, especialmente entre los ingenieros civiles y sanitarios de los Estados Unidos encargados del desarrollo de los sistemas de acueducto de las ciudades norteamericanas. Este uso extendido se reflejó en las normas de diseño expedidas en ese país. Las cuales fueron heredadas por muchos otros países.

La desventaja de la ecuación de Hazen-Williams radica en que algunas veces se olvida que es una ecuación válida para un determinado rango de velocidades y de diámetros de las tuberías. De esta manera, lleva a diseños ineficientes, ya que en general por fuera de los rangos de validez la ecuación tiende a sobrestimar y sub estimar los diámetros requeridos, fenómeno que más adelante se explicará en detalle. Por otro lado, a partir del gran auge en el uso de computadores, la utilización de una ecuación no explícita dejó de ser un problema. Por esta razón se ha vuelto a generalizar, en especial en los países europeos, el uso de la

ecuación físicamente basada de Darcy-Weisbach, la cual no tiene ningún tipo de restricciones.

En el siguiente capítulo veremos comparativas entre los 2 métodos.

### 2.3.4.1 Coeficiente de Hazen – Williams

Al emplear la ecuación de Hazen-Williams en el análisis de conducciones de agua, es indispensable conocer el coeficiente de esta ecuación para calcular las pérdidas por fricción en cada una de las tuberías, ya que este es un factor que depende de la tubería (rugosidad) y se muestran en la tabla N°4:

*Tabla 4: Coeficiente de Hazen-Williams*

Material	C	Material	C
Asbesto cemento	140	Hierro galvanizado	120
Latón	130-140	Vidrio	140
Ladrillo de saneamiento	100	Plomo	130-140
Hierro fundido nuevo	130	Plástico (PE, PVC)	140-150
Hierro fundido, 10 años de edad	107-113	Tubería lisa nueva	140
Hierro fundido, 20 años de edad	89-100	Acero nuevo	140-150
Hierro fundido, 30 años de edad	75-90	Acero	130
Hierro fundido, 40 años de edad	64-83	Acero rolado	110
Concreto	120-140	Lata	130
Cobre	130-140	Madera	120
Hierro dúctil	120	Hormigón	120-140

Fuente: <https://es.slideshare.net/lorenchoIII/hidraulica>

### 2.3.4.2 Limitaciones en el uso de la ecuación de Hazen – Williams

“Se tiende a considerar que el coeficiente  $C_{hw}$  es un índice que depende únicamente de la condición de lisura de la superficie del conducto y la edad de este” (Pérez Franco 2002). En la literatura sobre el tema se pueden encontrar tablas, donde aparecen valores referentes para diferentes tipos de materiales para cuando son nuevos y limpios y cuando llevan varios años de explotación (diseño).

Este último valor toma en cuenta la acumulación de sedimentos y depósitos que se acumulan en la parte interna del conducto después de algún tiempo de funcionamiento, incluso cuando agua limpia fluye por él. Los conductos más lisos tienen valores más altos del coeficiente

$C_{hw}$  en comparación con los más rugosos. Es poco conocido que la información que se brinda en estas tablas son correspondientes a diámetros iguales o mayores que 1000 mm (40”). “Para diámetros menores que 1000 mm se debería realizar una corrección a los valores de los coeficientes de Hazen-Williams que aparecen tabulados para obtener unos valores corregidos de dichos coeficientes” (Christensen 2000). También se debe mencionar que es aplicable solamente al flujo de agua en tuberías mayores de 5 cm (2”) y a velocidades menores de 3 m/s

#### **2.3.4.3 Relación de los coeficientes de fricción $C_{hw}$ con el factor de fricción $f$ de Darcy-Weisbach**

Un considerable número de investigaciones han sido dedicadas a la determinación del coeficiente  $C_{hw}$  perteneciente a tuberías hechas de diferentes materiales. Otras más han sido dirigidas a la optimización y calibración del diseño de redes de tuberías. “Es un error común plantear que este coeficiente no tiene relación alguna con la rugosidad relativa y el número de Reynolds. Esto significaría que el valor de este coeficiente de Hazen-Williams se mantiene constante, lo cual constituye un grave error conceptual y técnico, que atenta contra la precisión en el diseño de redes hidráulicas para el abastecimiento de agua potable” (Bombardelli and García 2003).

Vennard en 1958 expresó que una de las desventajas de esta ecuación es: “la imposibilidad de aplicarla a todo fluido en cualquier condición”. Diskin (1960) fue el primero en conocer las limitaciones de la ecuación y en comprometerse en investigar los límites de aplicación de la misma. Primeramente relacionó el factor de fricción  $f$  de la ecuación de Darcy-Weisbach que sí depende de la rugosidad relativa y del número de Reynolds, con el coeficiente de Hazen-Williams. Luego reacomodó y llevó la ecuación Hazen-Williams a la forma de DarcyWeisbach, pudiendo obtener así, una relación entre  $f$ ,  $C_{WH}$ ,  $D$  y  $Re$  mediante la siguiente ecuación.

$$f = \frac{1013,673}{D^{0,019} R_e^{0,148} C_{hw}^{1,852}}$$

Donde:

f: factor de fricción de la ecuación de Darcy-Weisbach (adimensional)

$C_{hw}$ : coeficiente de fricción de la ecuación de Hazen-Williams (adimensional)

D: diámetro de la tubería (m)

Re: número de Reynolds (adimensional).

En dicha expresión, la viscosidad cinemática del agua fue considerada a 15 °C; esta ecuación demuestra que el coeficiente  $C_{hw}$  no es constante para cierta rugosidad de la pared del tubo, como es interpretada en numerosos manuales; es decir, depende del régimen del flujo, el diámetro de la tubería, la rugosidad relativa de la pared y de la viscosidad cinemática  $\nu$ , que es función de la temperatura del agua. Con base en estos resultados, Diskin ubicó en el diagrama de Moody diferentes valores de  $C_{hw}$  y D calculados con esta ecuación. Con esto concluyó que la fórmula es aplicable en parte de la zona de transición y que la aplicación de la fórmula es apropiada para un rango de valores de  $C_{hw}$  entre 100 y 160.

Swamee y Jain (1976) presentaron análisis muy similares considerando la precisión de la ecuación de Hazen-Williams. En ambos casos la ecuación fue llevada al tipo de fórmula de Darcy-Weisbach. Swamee y Jain (1976) por su parte, introdujeron valores de  $C_{hw}$  en su fórmula resultante y los correspondientes valores de (f) fueron comparados con la contraparte obtenida con una precisión explícita para una presentación de la ecuación de Colebrook-White, previamente desarrollada por Swamee y Jain (1976), hechos para diferentes valores de pendiente y radio hidráulico. Concluyeron que dos fuentes independientes de error afectan la ecuación de Hazen-Williams, a saber: el cambio en el factor 1,318 en términos de R y S, y el cambio de  $C_{hw}$  con el régimen del flujo y el diámetro del tubo, lo cual conllevó a que finalmente presentaran una fórmula de Hazen-Williams modificada.

Recientemente Liou (1998) derivó, a través de procedimientos similares a los empleados por Diskin (1960) y Swamee and Jain (1976), una expresión para calcular el coeficiente  $C_{hw}$ . Liou trazó valores del coeficiente  $C_{hw}$  en términos de R y  $\varepsilon/D$  para diferentes diámetros de tuberías. Él tomó valores razonables para  $\nu$ , tomó  $\varepsilon$  como constante y calculó valores de (f)

con la fórmula de Coolebrok-White. Finalmente concluyó que esas mediciones “cubren solo una porción de la zona de transición” conforme a la investigación realizada por Diskin. También calculó los errores en la línea del gradiente de energía cuando la ecuación de Hazen-Williams es usada en lugar de la de Darcy-Weisbach y encontró errores relativamente pequeños dentro del rango correspondiente, pero cuando se aplica por encima de dicho rango, se obtienen errores mayores que  $\pm 40 \%$  y finalmente recomendó evitar su uso.

Por su parte Christensen (2000) propuso un diagrama con zonas de aplicación de las fórmulas de Manning y Hazen-Williams en el contexto del diagrama de Moody. De acuerdo con su trazo, se podía obtener un valor mínimo para  $\varepsilon/D$  debajo del cual la fórmula de Hazen-Williams no es aplicable.

A continuación se presentan las diferentes expresiones para el cálculo del coeficiente de Hazen-Williams que aparecen con mayor frecuencia en la literatura sobre el tema. La principal característica de estas ecuaciones es que en ellas se tienen en cuenta la rugosidad, así como la viscosidad cinemática expresados a través del factor de fricción de Darcy-Weisbach ( $f$ ) y del número de Reynolds ( $Re$ ) respectivamente:

$$\text{Diskin (1960): } C_{hw} = \left( \frac{1013,673}{f D^{0,019} Re^{0,148}} \right)^{0,54}$$

$$\text{Martínez y Fernández (2005): } C_{hw} = 13,79 f^{-0,54} \left( \frac{Q^{-0,08}}{D^{-0,0675}} \right)$$

$$\text{Liou (1998): } C_{hw} = \left( \frac{129 D^{0,129}}{f Q^{0,148}} \right)^{0,54}$$

Donde:

$f$ : factor de fricción de la ecuación de Darcy-Weisbach (adimensional)

$C_{hw}$ : coeficiente de fricción de la ecuación de Hazen-Williams (adimensional)

$D$ : diámetro de la tubería (m)

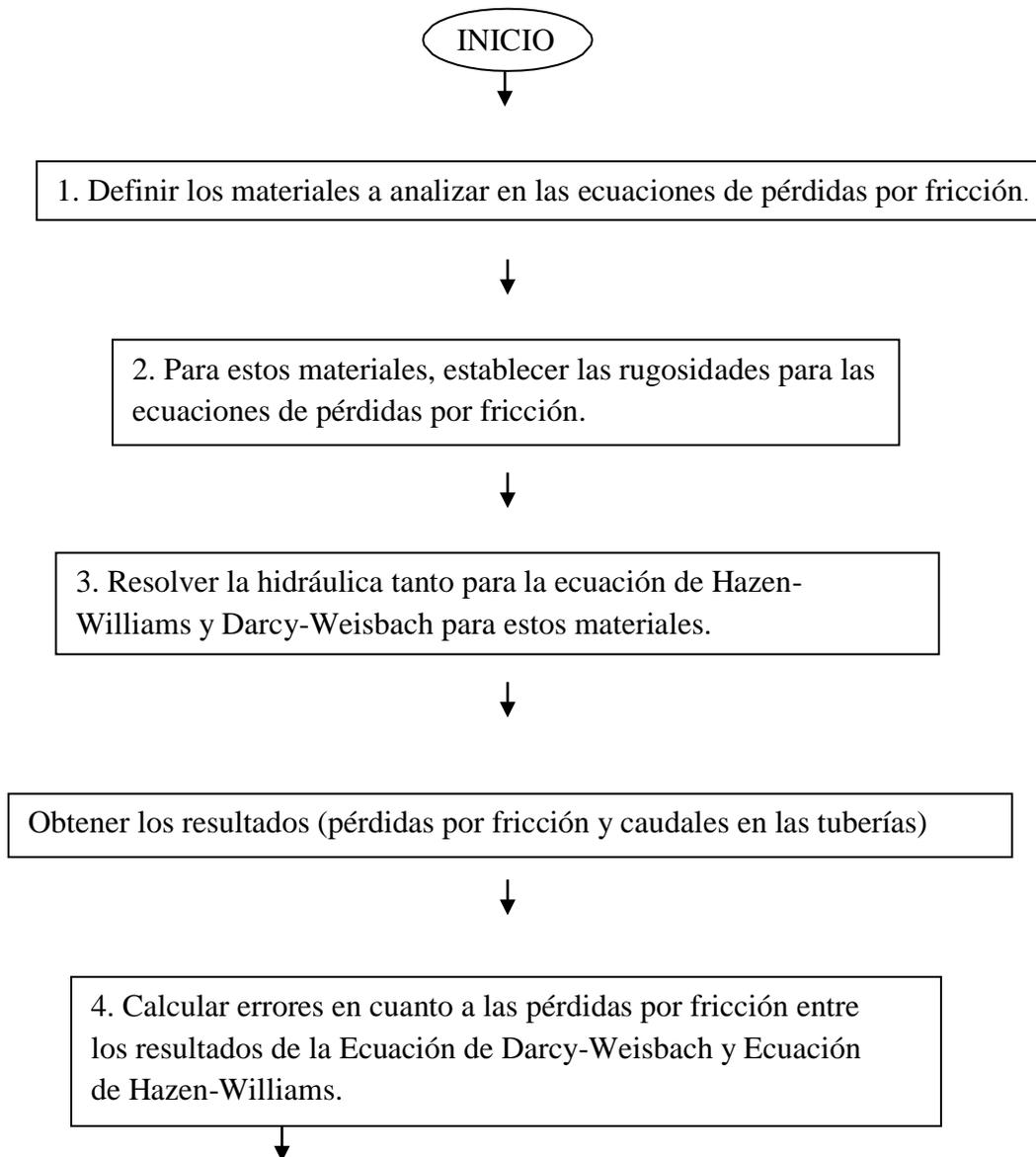
$Re$ : número de Reynolds (adimensional).

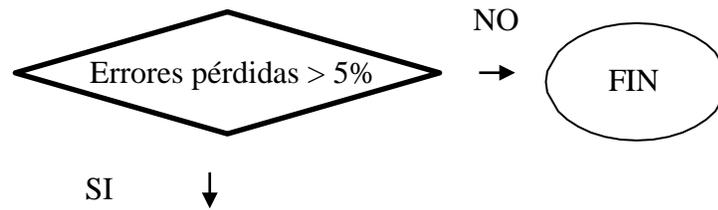
$Q$ : caudal ( $m^3/s$ )

Con el objetivo de conocer la influencia que ejercen estos coeficientes en los resultados finales del cálculo de la pérdida de carga, se compararon dichas pérdidas calculadas por la ecuación de Hazen-Williams, con las pérdidas obtenidas por la ecuación de Darcy-Weisbach, utilizando la expresión del factor de rugosidad ( $f$ ) tomando como referencia patrón la ecuación de Colebrook-White.

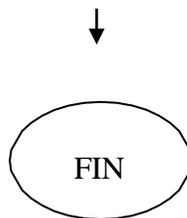
### **CAPÍTULO III: METODOLOGÍA PARA DETERMINAR Y ANALIZAR EL USO DE LAS ECUACIONES DE HAZEN-WILLIAMS Y DARCY-WEISBACH**

Se analizará el efecto del uso de la ecuación de Darcy-Weisbach frente a la ecuación de Hazen-Williams en tuberías de distinto diámetro. Para ello, se llevará a cabo la siguiente metodología, a fin de calcular la variación de los coeficientes de Hazen-Williams en conducciones cerradas a presión, determinar su efecto en los errores en las pérdidas por fricción y su correspondiente corrección para minimizar estos errores.





6. Diseñar una hoja Excel con la capacidad de corregir el coeficiente Hazen – Williams.



### 3.1 Selección de datos

Con el fin de comparar las pérdidas por fricción calculadas por ambas ecuaciones se vio conveniente la selección de los siguientes parámetros:

Para la selección de estos parámetros se recurrió a normas y guías vigentes.

- Reglamentos técnicos de diseño para sistemas de agua potable (NB689).
- Guías para la elaboración de estudios de diseño técnico de preinversión para proyectos de riego (menores, medianos y mayores).
- Norma de materiales de saneamiento básico (NB 645-646)

– Diámetro:

$$D = 1'', 2'', 3'', 4'', 6'', 8'', 10'' \text{ y } 12''$$

Debido al gran crecimiento de ciudades y centros poblados se vio conveniente utilizar una gama de diámetros entre 1'' a 12'' por norma no se recomienda un uso por debajo de 1'' para redes de agua potable por lo que se determinó diámetro mínimo 1'' y como diámetro superior un diámetro de 12''.

- Temperatura:

$$T= 15^{\circ}\text{C}$$

La temperatura del agua se definió en 15 °C, cabe mencionar que una limitante de la ecuación de Hazen – Williams es la temperatura del agua para la que fue desarrollada la ecuación (15°C), es por eso que para poder realizar esta comparación se adoptó esta temperatura como parámetro de estudio.

- Materiales:

- Fierro Fundido (FF)
- Fierro Fundido Dúctil (FFD)
- Fierro Galvanizado (FG)
- Poli Cloruro de Vinilo (PVC)
- Polietileno de Alta Densidad (PEAD)

Los materiales seleccionados para la comparación son todos aquellos que son nombrados en las normas ya citadas los cuales son: FF, FFD, FG, PVC Y PEAD.

- Velocidad del agua:

$$V= 0,2 - 5 \text{ m/s}$$

La velocidad, se definió como límite inferior 0,2 m/s valor que es inferior a lo recomendado en la norma boliviana (NB689) debido a que estas son recomendaciones las cuales pueden ser pasados por alto ante algún justificativo valido es por eso que se tomó como valor 0,2 m/s para de alguna manera poder observar cuales son los efectos a una velocidad un poco menor a lo recomendado y un límite superior de 5 m/s ya que en la norma ya mencionada se recomienda hasta esa velocidad para algunos materiales.

### **3.2 Selección de rugosidades**

Recopilando literatura y catálogos que hacen mención a tuberías se decidió tomar estos parámetros:

Tabla 5: Selección de rugosidades para los materiales planteados

Material	Coefficiente H-W	Rugosidad absoluta (mm)
FF	130	0,15
FFD	120	0,25
FG	120	0,15
PVC	140	0,0025
PEAD	140	0,0015

Fuente: Elaboración propia

### 3.3 Procedimiento para el cálculo hidráulico de las pérdidas por Fricción

A continuación se describe el procedimiento que se realizó en el desarrollo de este trabajo para calcular la hidráulica, a fin de obtener las pérdidas por fricción.

- Seleccionar el diámetro con el cual se desea trabajar, en este trabajo se realizó un análisis en tuberías desde 1” hasta 12”
- Establecer la viscosidad cinemática del agua, con base en la temperatura del agua. Para este trabajo se adoptó una viscosidad cinemática de  $1,15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  que es la correspondiente a agua a  $15^\circ\text{C}$
- Definir los materiales a utilizar en el trabajo, se decidió trabajar con los 5 materiales mencionados por norma que son : FF, FFD, FG, PVC y PEAD
- Seleccionar el rango de velocidades en las que se trabajarán, se vio conveniente trabajar entre 0,2 m/s y 5 m/s.
- Definir la rugosidad absoluta y los coeficientes de Hazen - Williams para cada uno de los materiales a analizar.
- Correr la hidráulica de las ecuaciones de resistencia fluida, de acuerdo con los valores preseleccionados.

#### 3.3.1 Darcy-Weisbach

- Se deberán realizar cálculos menores con el objetivo de definir parámetros en ciertas unidades como la velocidad en m/s, la longitud en m, el diámetro en m y la aceleración de la gravedad en  $\text{m}/\text{s}^2$ .
- Para la ecuación de Darcy-Weisbach posteriormente debemos definir el flujo en el que estamos trabajando a través de ecuación de Reynolds, como número crítico para seleccionar este parámetro tomaremos 2000, es decir, flujos con

un número de Reynolds menor o igual a 2000 serán catalogados como flujos laminares y flujos como un número de Reynolds mayor a 2000 serán catalogados como flujos turbulentos.

- La definición del flujo en el que se está trabajando nos servirá para poder seleccionar la correlación que deberemos utilizar, Hagen - Poiseuille para flujo laminar y la ecuación de Colebrook – White para flujo turbulento, estas para el cálculo del factor adimensional (f) para la ecuación de Darcy – Weisbach, se utilizó estas correlaciones debido a que aportan con mayor exactitud en nuestro calculo, la utilización de la intersección de gráficas para definir el factor (f) de la ecuación de Darcy-Weisbach introduce un mayor error en nuestro calculo debido a que estas gráficas están plasmadas en escala logarítmica por lo que se recomienda el uso de las ecuaciones.
- Una vez definido el factor f y los demás parámetros se procede al cálculo de la pérdida por fricción introduciendo los datos en las unidades ya mencionas para las cuales la pérdida por fricción nos arrojará en m.

### **3.3.2 Hazen-Williams**

Para el cálculo de pérdidas por fricción con la ecuación de Hazen- Williams es mucho más sencillo el cálculo, el cual se detalla a continuación:

- Se deberán realizar cálculos menores con el objetivo de definir los parámetros en ciertas unidades, el caudal en  $m^3/s$ , la longitud en m y el diámetro en m.
- Se deberá seleccionar un coeficiente de Hazen-Williams, el cual es una característica del material con el que se va a trabajar, se puede seleccionar ya sea de literatura referida al tema o de la tabla 10 propuesta en este trabajo.
- Una vez definido estos parámetros se procede al cálculo de la pérdida por fricción introduciendo los datos en las unidades ya mencionadas para las cuales la pérdida de fricción es arrojada en m.

Se muestra en la tabla 11 en la cual se realizaron todos los cálculos antes mencionados dando como resultado las pérdidas por fricción para tubería de PVC.

### 3.4 Cálculo de la variación del coeficiente de Hazen – Williams y su efecto en las pérdidas por fricción

Luego de haber obtenido los resultados de cada uno de los materiales de estudio utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach y la ecuación de Hazen-Williams, se procede a calcular la variación de los coeficientes de Hazen-Williams y su efecto en los errores en el cálculo de las pérdidas por fricción y presiones.

#### 3.4.1 Variación Coeficiente de Hazen-Williams

Se calculan los errores en las pérdidas por fricción, para determinar el efecto del uso de la ecuación de Hazen-Williams en las redes de estudio. Para ello, se calculó para cada tubería y cada velocidad el error relativo, tomando como valor teórico los resultados obtenidos por medio de la ecuación de Darcy-Weisbach, como se muestra a continuación.

$$\text{Error pérdida (\%)} = \frac{\text{Pérdida (H - W)} - \text{Pérdida (D - W)}}{\text{Pérdida (D - W)}}$$

Donde:

Error pérdida= diferencia de pérdidas expresada en porcentaje

Pérdida (H-W)= pérdida por fricción con la ecuación de Hazen-Williams

Pérdida (D-W)= pérdida por fricción con la ecuación de Darcy-Weisbach

A partir de esta ecuación, se busca detectar los errores que produce la ecuación de Hazen-Williams en la sobreestimación (Error positivo) y en la subestimación de las pérdidas de energía (Error negativo), con especial énfasis en este último, dado que en la realidad se estaría perdiendo mayor energía y por lo tanto la red diseñada a partir de la ecuación de Hazen-Williams no estaría en capacidad de suministrar agua a una determinada población.

Tabla 6: Cálculo del error relativo en pérdidas por fricción tubería PVC 1''

Darcy Weisbach Hazen Williams

140

LONGITUD	CAUDAL DISEÑO	DIÁMETRO	DIÁMETRO	VELOCIDAD	Re	f	f'	PÉRDIDA DE CARGA	PÉRDIDA DE CARGA	% DE ERROR
(m)	(l/s)	(PULG)	(m)	(m/s)				(m)	(m)	
1,00	0,10	1	0,025	0,20	4417	0,04	0,04	0,0031	0,0027	-15,0
1,00	0,46	1	0,025	0,91	20124	0,03	0,03	0,0434	0,0440	1,3
1,00	0,82	1	0,025	1,62	35830	0,02	0,02	0,1206	0,1280	6,2
1,00	1,18	1	0,025	2,33	51536	0,02	0,02	0,2306	0,2510	8,8
1,00	1,54	1	0,025	3,04	67243	0,02	0,02	0,3718	0,4107	10,5
1,00	1,90	1	0,025	3,76	82949	0,02	0,02	0,5428	0,6059	11,6
1,00	2,26	1	0,025	4,47	98655	0,02	0,02	0,7426	0,8354	12,5
1,00	2,53	1	0,025	5,00	110435	0,02	0,02	0,9115	1,0294	12,9

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7: Cálculo del error relativo en pérdidas por fricción tubería PVC 2''

Darcy Weisbach Hazen Williams

140

LONGITUD	CAUDAL DISEÑO	DIÁMETRO	DIÁMETRO	VELOCIDAD	Re	f	f'	PÉRDIDA DE CARGA	PÉRDIDA DE CARGA	% DE ERROR
(m)	(l/s)	(PULG)	(m)	(m/s)				(m)	(m)	
1,00	0,405	2	0,051	0,20	8835	0,03	0,03	0,0013	0,0012	-7,9
1,00	1,847	2	0,051	0,91	40247	0,02	0,02	0,0184	0,0196	6,5
1,00	3,288	2	0,051	1,62	71660	0,02	0,02	0,0515	0,0570	10,7
1,00	4,729	2	0,051	2,33	103072	0,02	0,02	0,0991	0,1118	12,9
1,00	6,171	2	0,051	3,04	134485	0,02	0,02	0,1603	0,1830	14,2
1,00	7,612	2	0,051	3,76	165898	0,02	0,02	0,2346	0,2700	15,1
1,00	9,053	2	0,051	4,47	197310	0,02	0,02	0,3217	0,3723	15,7
1,00	10,134	2	0,051	5,00	220870	0,02	0,02	0,3951	0,4588	16,1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8: Cálculo del error relativo en pérdidas por fricción tubería PVC 3''

LONGITUD	CAUDAL DISEÑO	DIAMETRO	DIAMETRO	VELOCIDAD	Re	f	f'	Darcy Weisbach	Hazen Williams	% DE ERROR
								PERDIDA DE CARGA	PERDIDA DE CARGA	
(m)	(l/s)	(PULG)	(m)	(m/s)				(m)	(m)	
1,00	0,912	3	0,076	0,20	13252	0,03	0,03	0,0008	0,0007	-4,3
1,00	4,155	3	0,076	0,91	60371	0,02	0,02	0,0112	0,0122	9,1
1,00	7,398	3	0,076	1,62	107490	0,02	0,02	0,0315	0,0356	12,8
1,00	10,641	3	0,076	2,33	154609	0,02	0,02	0,0607	0,0697	14,8
1,00	13,884	3	0,076	3,04	201728	0,02	0,02	0,0984	0,1141	15,9
1,00	17,127	3	0,076	3,76	248846	0,02	0,02	0,1442	0,1683	16,7
1,00	20,370	3	0,076	4,47	295965	0,01	0,01	0,1980	0,2320	17,2
1,00	22,802	3	0,076	5,00	331304	0,01	0,01	0,2433	0,2859	17,5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9: Cálculo del error relativo en pérdidas por fricción tubería PVC 4''

LONGITUD	CAUDAL DISEÑO	DIAMETRO	DIAMETRO	VELOCIDAD	Re	f	f'	Darcy Weisbach	Hazen Williams	% DE ERROR
								PERDIDA DE CARGA	PERDIDA DE CARGA	
(m)	(l/s)	(PULG)	(m)	(m/s)				(m)	(m)	
1,00	1,621	4	0,102	0,20	17670	0,03	0,03	0,0005	0,0005	-1,8
1,00	7,387	4	0,102	0,91	80495	0,02	0,02	0,0079	0,0087	10,7
1,00	13,152	4	0,102	1,62	143320	0,02	0,02	0,0223	0,0254	14,2
1,00	18,917	4	0,102	2,33	206145	0,02	0,02	0,0430	0,0498	15,9
1,00	24,682	4	0,102	3,04	268970	0,02	0,02	0,0698	0,0816	16,9
1,00	30,447	4	0,102	3,76	331795	0,01	0,01	0,1023	0,1203	17,6
1,00	36,213	4	0,102	4,47	394620	0,01	0,01	0,1405	0,1659	18,1
1,00	40,537	4	0,102	5,00	441739	0,01	0,01	0,1728	0,2045	18,3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10: Cálculo del error relativo en pérdidas por fricción tubería PVC 6''

LONGITUD	CAUDAL DISEÑO	DIAMETRO	DIAMETRO	VELOCIDAD	Re	f	f'	Darcy Weisbach	Hazen Williams	% DE ERROR
								PERDIDA DE CARGA	PERDIDA DE CARGA	
(m)	(l/s)	(PULG)	(m)	(m/s)				(m)	(m)	
1,00	3,648	6	0,152	0,20	26504	0,02	0,02	0,0003	0,0003	1,3
1,00	16,620	6	0,152	0,91	120742	0,02	0,02	0,0048	0,0054	12,7
1,00	29,592	6	0,152	1,62	214980	0,02	0,02	0,0137	0,0158	15,7
1,00	42,563	6	0,152	2,33	309217	0,01	0,01	0,0265	0,0311	17,2
1,00	55,535	6	0,152	3,04	403455	0,01	0,01	0,0431	0,0508	18,1
1,00	68,507	6	0,152	3,76	497693	0,01	0,01	0,0632	0,0750	18,7
1,00	81,479	6	0,152	4,47	591930	0,01	0,01	0,0869	0,1034	18,9
1,00	91,207	6	0,152	5,00	662609	0,01	0,01	0,1069	0,1274	19,2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11: Cálculo del error relativo en pérdidas por fricción tubería PVC 8''

LONGITUD	CAUDAL DISEÑO	DIAMETRO	DIAMETRO	VELOCIDAD	Re	f	f'	Darcy Weisbach	Hazen Williams	% DE ERROR
								PERDIDA DE CARGA	PERDIDA DE CARGA	
(m)	(l/s)	(PULG)	(m)	(m/s)				(m)	(m)	
1,00	6,486	8	0,203	0,20	35339	0,02	0,02	0,0002	0,0002	3,3
1,00	29,547	8	0,203	0,91	160989	0,02	0,02	0,0034	0,0039	13,9
1,00	52,607	8	0,203	1,62	286640	0,01	0,01	0,0097	0,0113	16,7
1,00	75,668	8	0,203	2,33	412290	0,01	0,01	0,0188	0,0222	18,0
1,00	98,729	8	0,203	3,04	537940	0,01	0,01	0,0306	0,0364	18,7
1,00	121,790	8	0,203	3,76	663590	0,01	0,01	0,0450	0,0536	19,2
1,00	144,851	8	0,203	4,47	789241	0,01	0,01	0,0619	0,0739	19,4
1,00	162,146	8	0,203	5,00	883478	0,01	0,01	0,0762	0,0911	19,6

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12: Calculo del error relativo en pérdidas por fricción tubería PVC 10”

LONGITUD	CAUDAL DISEÑO	DIAMETRO	DIAMETRO	VELOCIDAD	Re	f	f'	Darcy	Hazen	% DE ERROR
								Weisbach	Williams	
(m)	(l/s)	(PULG)	(m)	(m/s)				PERDIDA DE CARGA	PERDIDA DE CARGA	
								(m)	(m)	
1,00	10,134	10	0,254	0,20	44174	0,02	0,02	0,0002	0,0002	4,8
1,00	46,167	10	0,254	0,91	201237	0,02	0,02	0,0026	0,0030	14,7
1,00	82,199	10	0,254	1,62	358300	0,01	0,01	0,0074	0,0087	17,3
1,00	118,232	10	0,254	2,33	515362	0,01	0,01	0,0145	0,0171	18,5
1,00	154,264	10	0,254	3,04	672425	0,01	0,01	0,0235	0,0280	19,1
1,00	190,297	10	0,254	3,76	829488	0,01	0,01	0,0346	0,0413	19,5
1,00	226,329	10	0,254	4,47	986551	0,01	0,01	0,0476	0,0570	19,7
1,00	253,354	10	0,254	5,00	1104348	0,01	0,01	0,0586	0,0702	19,8

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13: Calculo del error relativo en pérdidas por fricción tubería PVC 12”

LONGITUD	CAUDAL DISEÑO	DIAMETRO	DIAMETRO	VELOCIDAD	Re	f	f'	Darcy	Hazen	% DE ERROR
								Weisbach	Williams	
(m)	(l/s)	(PULG)	(m)	(m/s)				PERDIDA DE CARGA	PERDIDA DE CARGA	
								(m)	(m)	
1,00	14,593	12	0,305	0,20	53009	0,02	0,02	0,0001	0,0001	5,9
1,00	66,480	12	0,305	0,91	241484	0,02	0,02	0,0021	0,0024	15,4
1,00	118,367	12	0,305	1,62	429959	0,01	0,01	0,0060	0,0071	17,7
1,00	170,254	12	0,305	2,33	618435	0,01	0,01	0,0117	0,0138	18,8
1,00	222,141	12	0,305	3,04	806910	0,01	0,01	0,0190	0,0227	19,3
1,00	274,027	12	0,305	3,76	995386	0,01	0,01	0,0279	0,0334	19,7
1,00	325,914	12	0,305	4,47	1183861	0,01	0,01	0,0384	0,0461	19,9
1,00	364,829	12	0,305	5,00	1325217	0,01	0,01	0,0473	0,0568	20,0

Fuente: Elaboración propia

El proceso es tedioso y repetitivo para ver los resultados de otros materiales ver:

**Ver anexo 1: Cálculo pérdidas por fricción para PVC**

**Ver anexo 2: Cálculo pérdidas por fricción para PEAD**

**Ver anexo 3: Cálculo pérdidas por fricción para FF**

**Ver anexo 4: Cálculo pérdidas por fricción para FFD**

**Ver anexo 5: Cálculo pérdidas por fricción para FG**

### **3.5 Corrección de errores en pérdidas por fricción:**

A partir de la Ecuación propuesta por Liou (1998) se propone una corrección del coeficiente de Hazen-Williams, se puede ver claramente que el coeficiente de la ecuación de Hazen-Williams no es un parámetro constante, ya que este depende de las características de la tubería (rugosidad y diámetro), del flujo (número de Reynolds) y del fluido (viscosidad cinemática). Por lo anterior, se calcularon los coeficientes de Hazen-Williams corregidos, para analizar la variabilidad de este parámetro con base en los resultados obtenidos en los materiales de estudio.

A continuación se describe el procedimiento que se realizó en el desarrollo de este trabajo para corregir el coeficiente de Hazen-Williams a través de la ecuación de Liou.

$$\text{Liou (1998): } C_{hw} = \left( \frac{129 D^{0,129}}{fQ^{0,148}} \right)^{0,54}$$

- Se deberán realizar cálculos menores con el objetivo de definir parámetros en ciertas unidades como la velocidad en m/s, la longitud en m, el diámetro en m, el caudal en m<sup>3</sup>/s.
- Al igual que en la ecuación de Darcy-Weisbach se debe de calcular el coeficiente “f”, es decir que el coeficiente de Hazen-Williams que se calculará será dependiente de las características de la tubería (rugosidad y diámetro), del flujo (número de

Reynolds) y del fluido (viscosidad cinemática).

- Con estas variables definidas calculamos la ecuación de Liou para los materiales seleccionados, los resultados de este proceso los observamos en las tablas a continuación.

*Tabla 14: Corrección del coeficiente de Hazen-Williams tubería PVC1''*

LONGITUD	CAUDAL DISEÑO	DIÁMETRO	DIÁMETRO	VELOCIDAD	C CORREGIDO	% DE ERROR
(m)	(l/s)	(PULG)	(m)	(m/s)		
1	0,10134	1	0,0254	0,20	129	-0,6
1	0,46167	1	0,0254	0,91	141	-0,6
1	0,82199	1	0,0254	1,62	145	-0,6
1	1,18232	1	0,0254	2,33	147	-0,6
1	1,54264	1	0,0254	3,04	148	-0,6
1	1,90297	1	0,0254	3,76	149	-0,6
1	2,26329	1	0,0254	4,47	150	-0,6
1	2,53354	1	0,0254	5,00	150	-0,6

Fuente: Elaboración propia

*Tabla 15: Corrección del coeficiente de Hazen-Williams tubería PVC 2''*

LONGITUD	CAUDAL DISEÑO	DIÁMETRO	DIÁMETRO	VELOCIDAD	C CORREGIDO	% DE ERROR
(m)	(l/s)	(PULG)	(m)	(m/s)		
1	0,40537	2	0,0508	0,20	134	-0,5
1	1,84667	2	0,0508	0,91	145	-0,5
1	3,28797	2	0,0508	1,62	148	-0,5
1	4,72927	2	0,0508	2,33	150	-0,5
1	6,17057	2	0,0508	3,04	151	-0,5
1	7,61187	2	0,0508	3,76	151	-0,5
1	9,05317	2	0,0508	4,47	152	-0,5
1	10,1341	2	0,0508	5,00	152	-0,5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16: Corrección del coeficiente de Hazen-Williams tubería PVC 3''

LONGITUD	CAUDAL DISEÑO	DIÁMETRO	DIÁMETRO	VELOCIDAD	C CORREGIDO	% DE ERROR
(m)	(l/s)	(PULG)	(m)	(m/s)		
1	0,91207	3	0,0762	0,20	137	-0,5
1	4,155	3	0,0762	0,91	147	-0,5
1	7,39793	3	0,0762	1,62	150	-0,5
1	10,6409	3	0,0762	2,33	151	-0,5
1	13,8838	3	0,0762	3,04	152	-0,5
1	17,1267	3	0,0762	3,76	153	-0,5
1	20,3696	3	0,0762	4,47	153	-0,5
1	22,8018	3	0,0762	5,00	153	-0,5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17: Corrección del coeficiente de Hazen-Williams tubería PVC 4''

LONGITUD	CAUDAL DISEÑO	DIÁMETRO	DIÁMETRO	VELOCIDAD	C CORREGIDO	% DE ERROR
(m)	(l/s)	(PULG)	(m)	(m/s)		
1	1,62146	4	0,1016	0,20	139	-0,4
1	7,38667	4	0,1016	0,91	148	-0,5
1	13,1519	4	0,1016	1,62	151	-0,5
1	18,9171	4	0,1016	2,33	152	-0,5
1	24,6823	4	0,1016	3,04	153	-0,5
1	30,4475	4	0,1016	3,76	153	-0,5
1	36,2127	4	0,1016	4,47	154	-0,5
1	40,5366	4	0,1016	5,00	154	-0,5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18: Corrección del coeficiente de Hazen-Williams tubería PVC 6”

LONGITUD	CAUDAL DISEÑO	DIÁMETRO	DIÁMETRO	VELOCIDAD	C CORREGIDO	% DE ERROR
(m)	(l/s)	(PULG)	(m)	(m/s)		
1	3,64829	6	0,1524	0,20	141	-0,4
1	16,62	6	0,1524	0,91	150	-0,4
1	29,5917	6	0,1524	1,62	152	-0,4
1	42,5634	6	0,1524	2,33	153	-0,5
1	55,5351	6	0,1524	3,04	153	-0,4
1	68,5069	6	0,1524	3,76	154	-0,4
1	81,4786	6	0,1524	4,47	154	-0,5
1	91,2073	6	0,1524	5,00	154	-0,4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19: Corrección del coeficiente de Hazen-Williams tubería PVC 8”

LONGITUD	CAUDAL DISEÑO	DIÁMETRO	DIÁMETRO	VELOCIDAD	C CORREGIDO	% DE ERROR
(m)	(l/s)	(PULG)	(m)	(m/s)		
1	6,48586	8	0,2032	0,20	143	-0,4
1	29,5467	8	0,2032	0,91	151	-0,4
1	52,6075	8	0,2032	1,62	152	-0,4
1	75,6683	8	0,2032	2,33	153	-0,4
1	98,7291	8	0,2032	3,04	154	-0,4
1	121,79	8	0,2032	3,76	154	-0,4
1	144,851	8	0,2032	4,47	154	-0,4
1	162,146	8	0,2032	5,00	155	-0,4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20: Corrección del coeficiente de Hazen-Williams tubería PVC 10''

LONGITUD	CAUDAL DISEÑO	DIÁMETRO	DIÁMETRO	VELOCIDAD	C CORREGIDO	% DE ERROR
(m)	(l/s)	(PULG)	(m)	(m/s)		
1	10,1341	10	0,254	0,20	144	-0,4
1	46,1667	10	0,254	0,91	151	-0,4
1	82,1992	10	0,254	1,62	153	-0,4
1	118,232	10	0,254	2,33	154	-0,4
1	154,264	10	0,254	3,04	154	-0,4
1	190,297	10	0,254	3,76	154	-0,4
1	226,329	10	0,254	4,47	155	-0,4
1	253,354	10	0,254	5,00	155	-0,4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21: Corrección del coeficiente de Hazen-Williams tubería PVC 12''

LONGITUD	CAUDAL DISEÑO	DIÁMETRO	DIÁMETRO	VELOCIDAD	C CORREGIDO	% DE ERROR
(m)	(l/s)	(PULG)	(m)	(m/s)		
1	14,5932	12	0,3048	0,20	145	-0,3
1	66,48	12	0,3048	0,91	152	-0,3
1	118,367	12	0,3048	1,62	153	-0,3
1	170,254	12	0,3048	2,33	154	-0,3
1	222,141	12	0,3048	3,04	154	-0,3
1	274,027	12	0,3048	3,76	155	-0,3
1	325,914	12	0,3048	4,47	155	-0,3
1	364,829	12	0,3048	5,00	155	-0,3

Fuente: Elaboración propia

El proceso es tedioso y repetitivo para ver los resultados de otros materiales ver:

**Ver anexo 1: Cálculo pérdidas por fricción para PVC**

**Ver anexo 2: Cálculo pérdidas por fricción para PEAD**

**Ver anexo 3: Cálculo pérdidas por fricción para FF**

**Ver anexo 4: Cálculo pérdidas por fricción para FFD**

**Ver anexo 5: Cálculo pérdidas por fricción para FG**

### **3.5.1 Programa para la corrección del coeficiente de Hazen-Williams**

Para desarrollar este programa para corregir los coeficientes de Hazen-Williams para cada uno de los materiales seleccionados, se elaboró una planilla Excel con la capacidad de poder corregir el coeficiente de Hazen-Williams a través de la ecuación de Liou y debemos mencionar sus características de esta planilla:

- La planilla no tiene limitantes en materiales, es decir se puede calcular un coeficiente de Hazen-Williams corregido para cualquier sea el material solo es necesario introducir su rugosidad relativa del material.
- El programa no tiene limitantes en relación a las velocidades, es decir, se puede calibrar un coeficiente de Hazen-Williams para cual quiera sea la velocidad seleccionada excepto para 0 m/s debido a que en ausencia de velocidad no hay perdidas en una tubería, lo que imposibilita un cálculo de un coeficiente de Hazen-Williams corregido.
- Una de las mayores ventajas de este programa es que se puede calcular un coeficiente de Hazen-Williams para ya sea agua o cualquier otro líquido incomprensible a cualquier temperatura, es decir, no tiene limitantes en la aplicación de cualquier viscosidad del líquido.
- Una limitante del programa es el diámetro máximo para el que se puede calcular un coeficiente e Hazem-Williams corregido (12”).

## **CAPÍTULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS**

### **4.1 Introducción**

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos en relación con los efectos del uso de la ecuación de Hazen-Williams vs la ecuación de Darcy-Weisbach en diferentes materiales. Para ello, este capítulo se dividirá en dos partes. En la primera, se analizará el efecto del uso de la ecuación de Hazen-Williams cuando se utiliza un coeficiente de rugosidad constante (sugerido en la literatura), a fin de establecer el efecto de esta suposición en la estimación de las pérdidas por fricción. Luego, con base en los hallazgos encontrados en esta primera parte, en la segunda se ilustrará el programa que se desarrolló para corregir los coeficientes de Hazen-Williams, procurando minimizar los errores en las pérdidas por fricción.

### **4.2 Efecto del uso de las ecuaciones de Hazen - Williams y Darcy - Weisbach**

En esta parte del trabajo se mostrarán los resultados obtenidos en relación con la variabilidad del coeficiente de Hazen-Williams en los materiales de estudio y su efecto en la estimación de las pérdidas por fricción, cuando se utiliza un coeficiente de rugosidad constante. Estos resultados se obtuvieron siguiendo los pasos que se mencionan en los subtítulos 3.1 (pág. 51), 3.2 (pág. 53), 3.3 (pág. 53), 3.4 (pág. 54) de la metodología propuesta.

#### **4.2.1 Variacion Coeficiente de Hazen – Williams**

En relación con los resultados obtenidos en la variación del coeficiente de Hazen-Williams para materiales como el FF, FFD, FG, PVC y PEAD (Ver Figuras 17,18, 19, 20 y 21) que los valores sugeridos en la literatura no analizan de manera correcta la magnitud de éstos para cualquier diámetro y rango de velocidad.

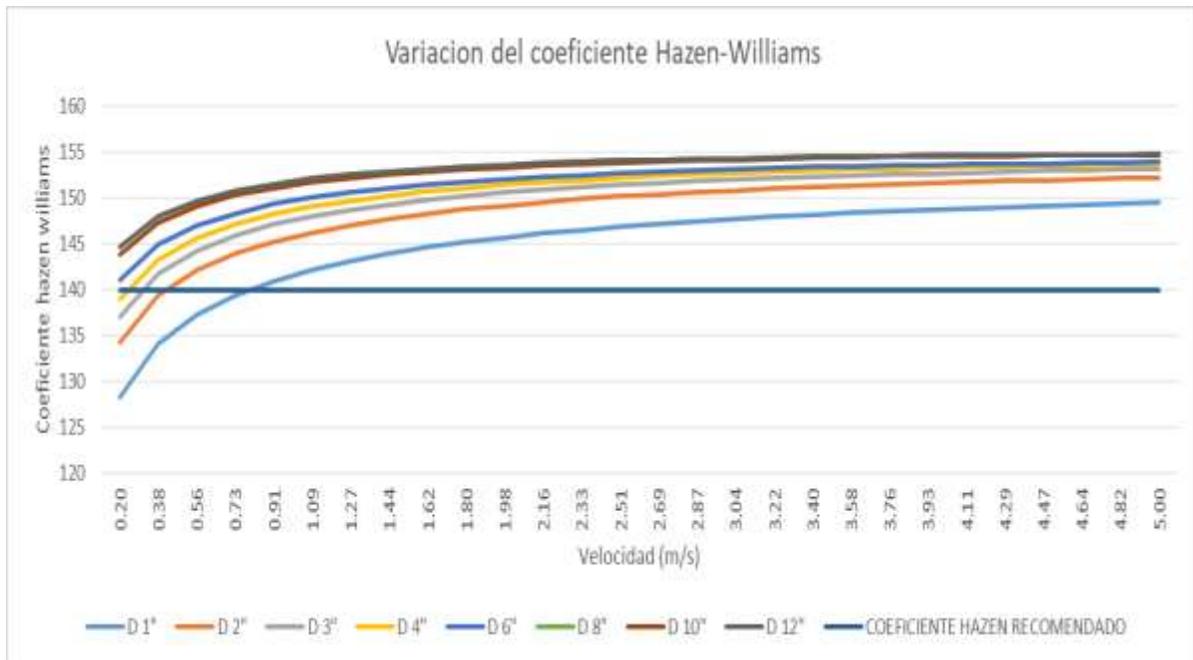


Figura 17: Variación del coeficiente Hazen – Williams para tubería “PVC”

Fuente: Elaboración propia

Para el caso de tubería de PVC se observa que el factor de fricción no es lineal como se considera al  $C_{hw}$ , se observa claramente que a mayor velocidad el coeficiente debería tomar un valor mayor. Para diámetros de 1”, 2” y 3” se observa que a bajas velocidades la ecuación de Hazen – Williams sub estima las pérdidas por fricción, a una velocidad de 0,2 m/s existe hasta un 15% de sub estimación, para estos diámetros por encima de velocidades de 0,70 m/s la ecuación de Hazen – Williams comienza una sobre estimación de las pérdidas por fricción y a mayor sea el diámetro mayor es la sobre estimación.

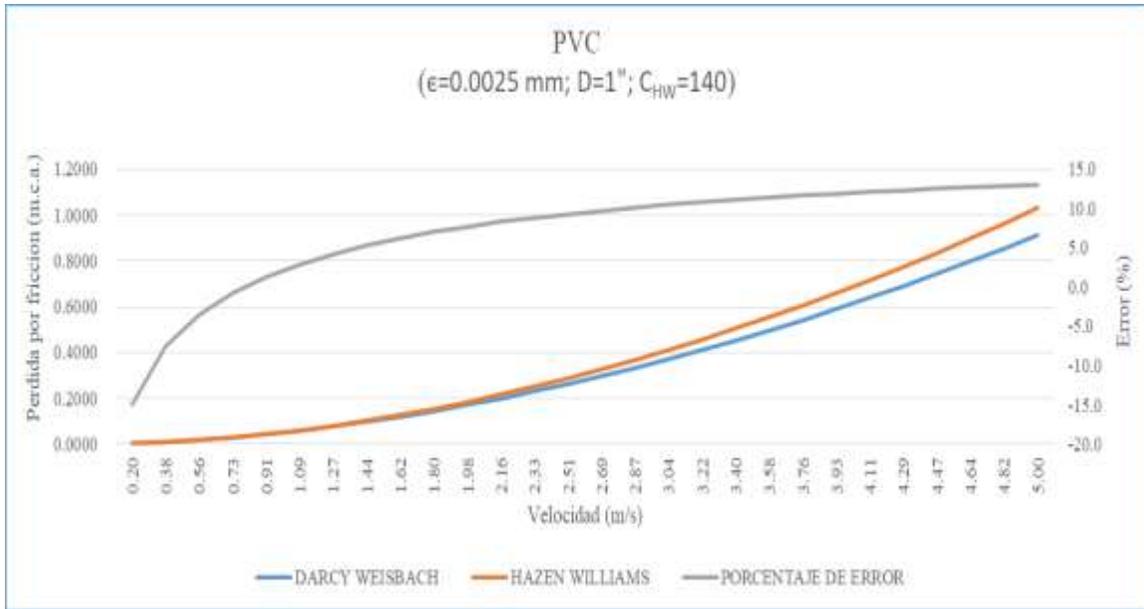


Figura 18: Variación en pérdidas por fricción tubería “PVC; D=1”  
Fuente: Elaboración propia

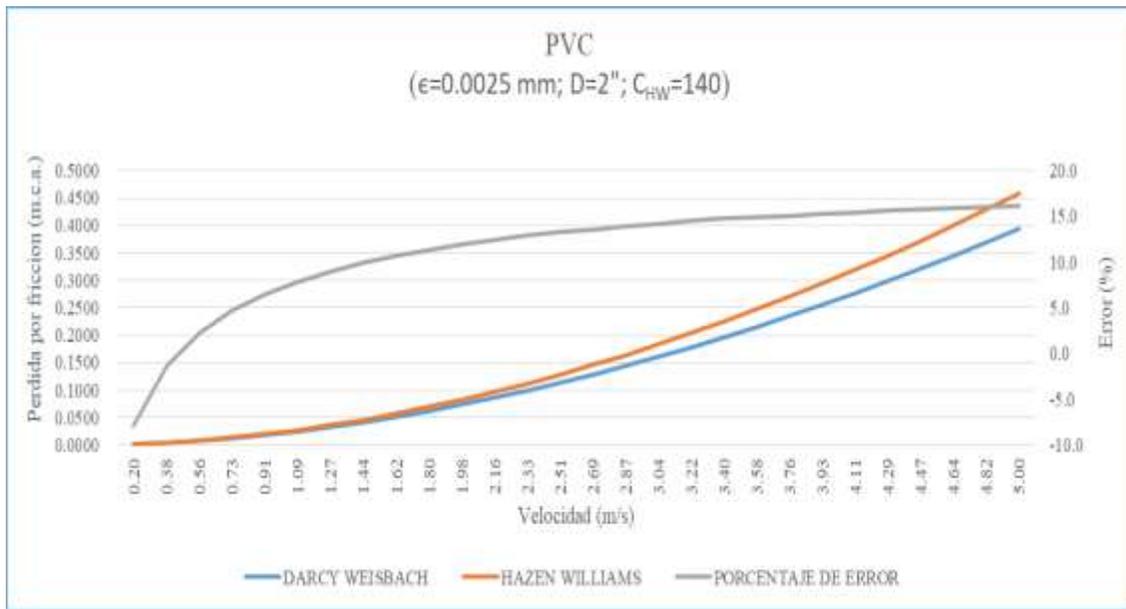


Figura 19: Variación en pérdidas por fricción tubería “PVC; D=2”  
Fuente: Elaboración propia

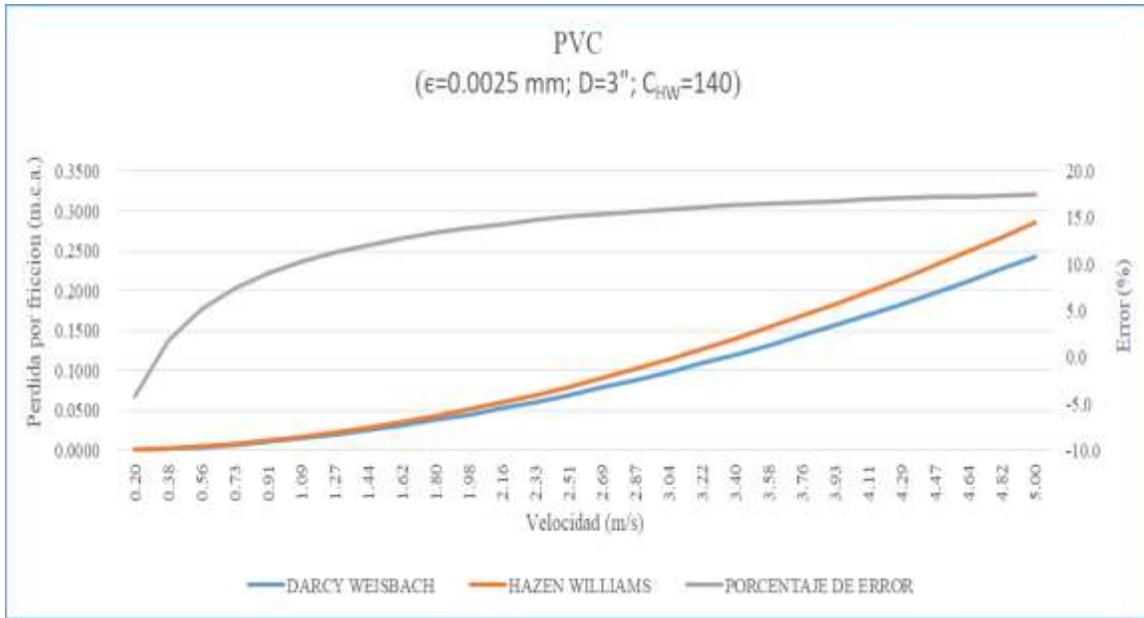


Figura 20: Variación en pérdidas por fricción tubería “PVC; D=3”  
Fuente: Elaboración propia

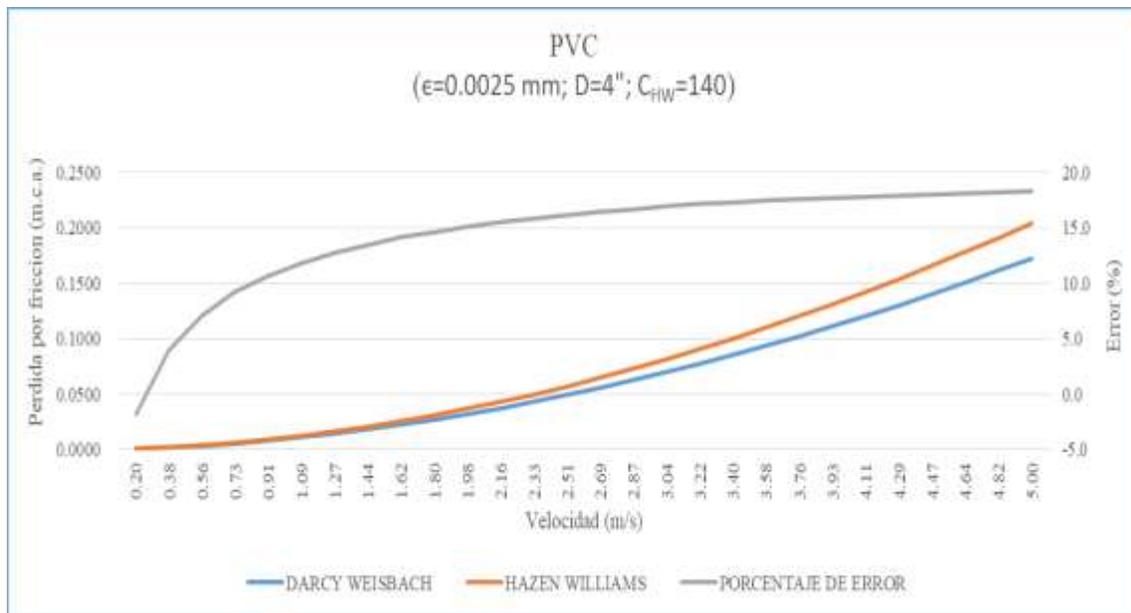
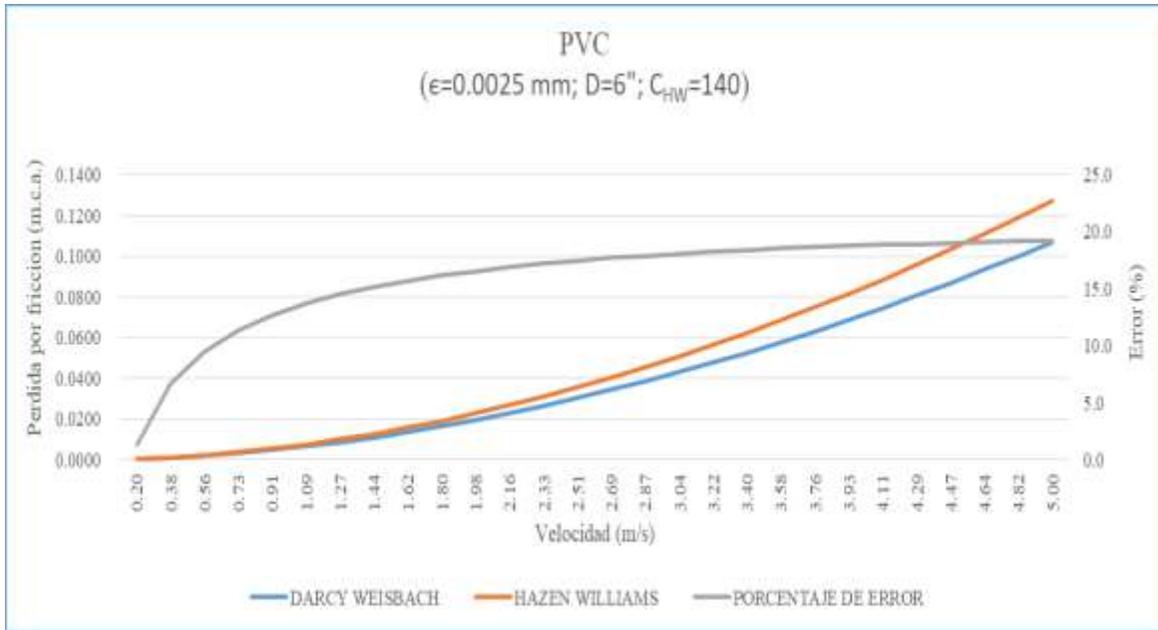
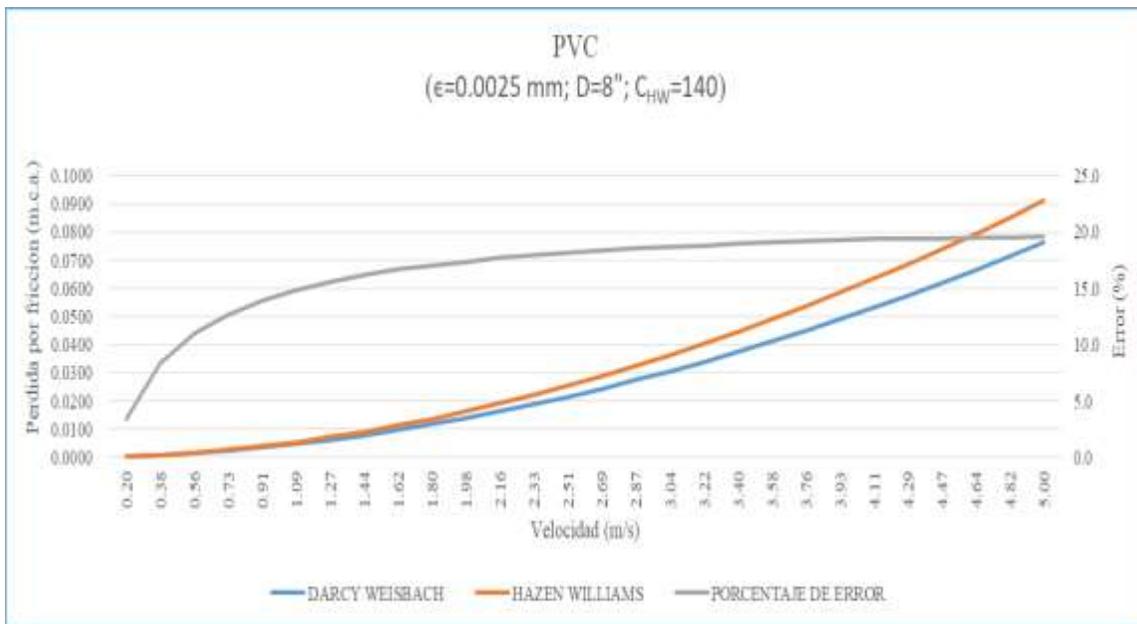


Figura 21: Variación en pérdidas por fricción tubería “PVC; D=4”  
Fuente: Elaboración propia



*Figura 22: Variación en pérdidas por fricción tubería “PVC; D=6”*  
Fuente: Elaboración propia



*Figura 23: Variación en pérdidas por fricción tubería “PVC; D=8”*  
Fuente: Elaboración propia

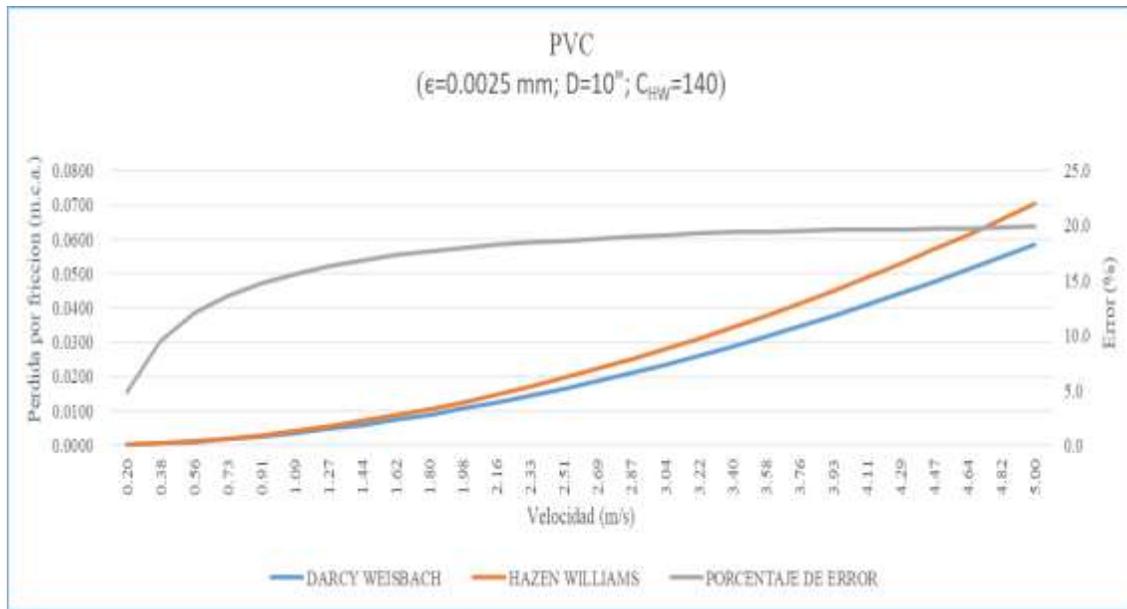


Figura 24: Variación en pérdidas por fricción tubería “PVC; D=10”  
Fuente: Elaboración propia

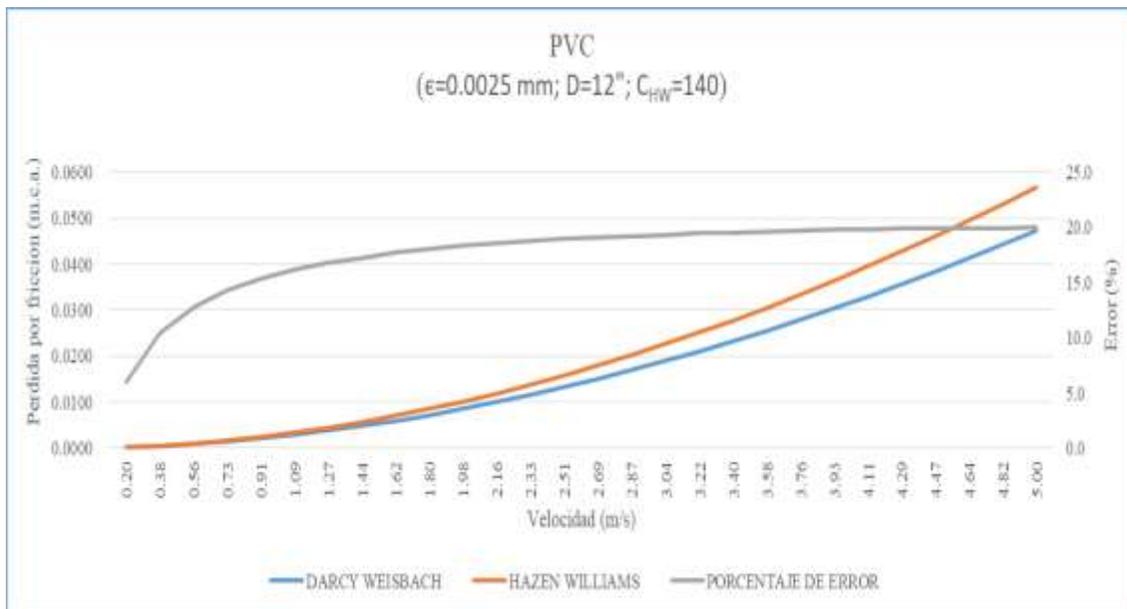


Figura 25: Variación en pérdidas por fricción tubería “PVC; D=12”  
Fuente: Elaboración propia

En la siguiente tabla se plasmas los porcentajes de sub estimación y sobre estimación que existe para tubería de PVC en conducciones a presión a 15°C.

Tabla 22: porcentaje de sub estimación y sobre estimación de pérdidas de carga para tubería PVC

Diámetro	Velocidad (m/s)					
	0,2	1	2	3	4	5
1"	-15	2,9	7,7	10,5	11,8	12,9
2"	-7,9	7,9	11,9	14,2	15,3	16,1
3"	-4,3	10,3	13,9	15,9	16,8	17,5
4"	-1,8	11,9	15,2	17	17,7	18,3
6"	1,3	13,7	16,6	18,1	18,7	19,2
8"	3,3	13,9	17,4	18,7	19,3	19,6
10"	4,8	14,9	17,9	19,1	19,6	19,9
12"	5,9	15,4	18,3	19,3	19,8	20

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla anterior las variaciones que se generan son de consideración desde un -15% hasta un 20% por lo que se recomienda realizar una corrección del coeficiente de Hazen – Williams para tubería PVC.

Para el caso de tubería de PEAD se observa que el factor de fricción no es lineal como se considera al  $C_{hw}$ , se observa claramente que a mayor velocidad el coeficiente debería tomar un valor mayor. Para diámetros de 1", 2" y 3" se observa que a bajas velocidades la ecuación de Hazen – Williams sub estima las pérdidas por fricción, a una velocidad de 0,2 m/s existe hasta un 14,9% de sub estimación, para estos diámetros por encima de velocidades de 0,70 m/s la ecuación de Hazen – Williams comienza una sobre estimación de las pérdidas por fricción y a mayor sea el diámetro mayor es la sobre estimación.

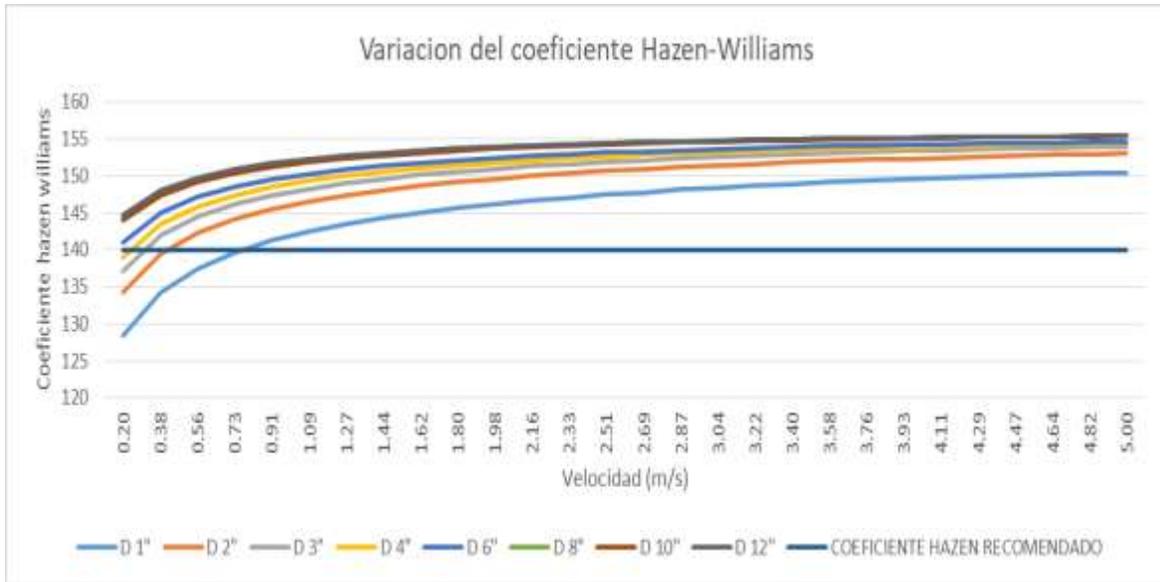


Figura 26: Variación del coeficiente Hazen – Williams para tubería “PEAD”  
Fuente: Elaboración propia

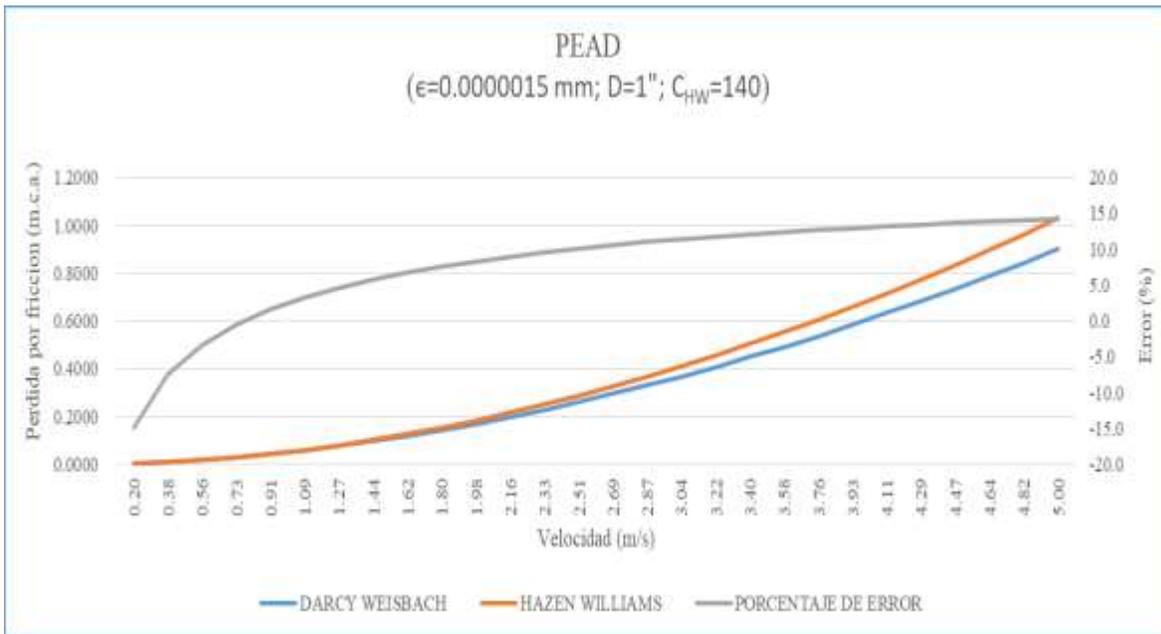


Figura 27: Variación en pérdidas por fricción tubería “PEAD; D=1”  
Fuente: Elaboración propia

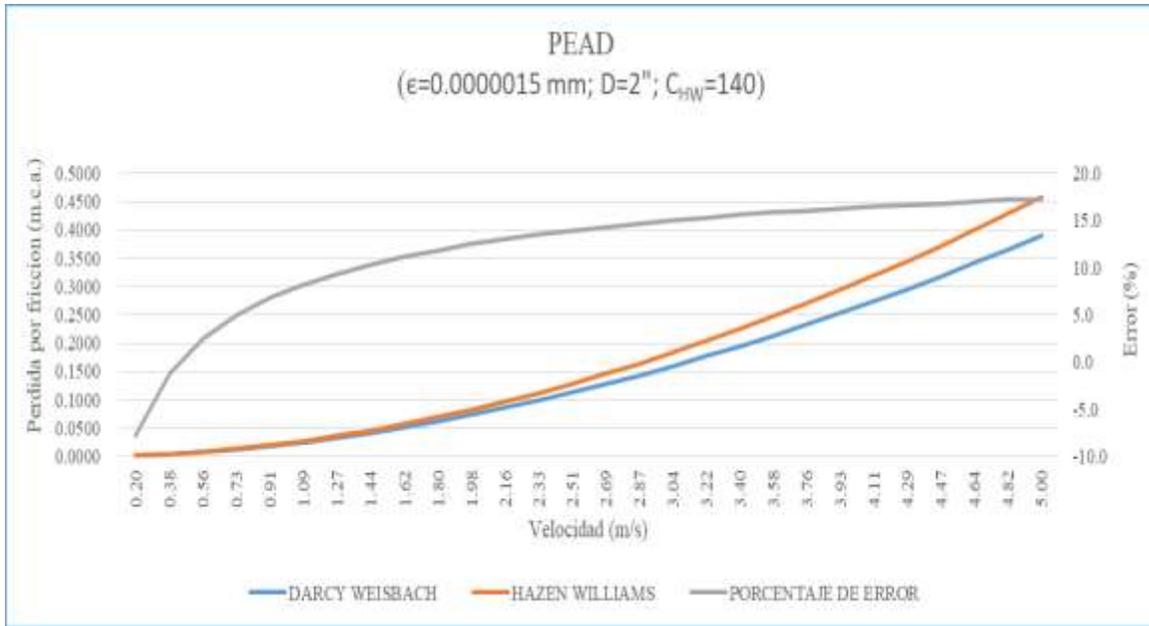


Figura 28: Variación en pérdidas por fricción tubería “PEAD; D=2”  
Fuente: Elaboración propia

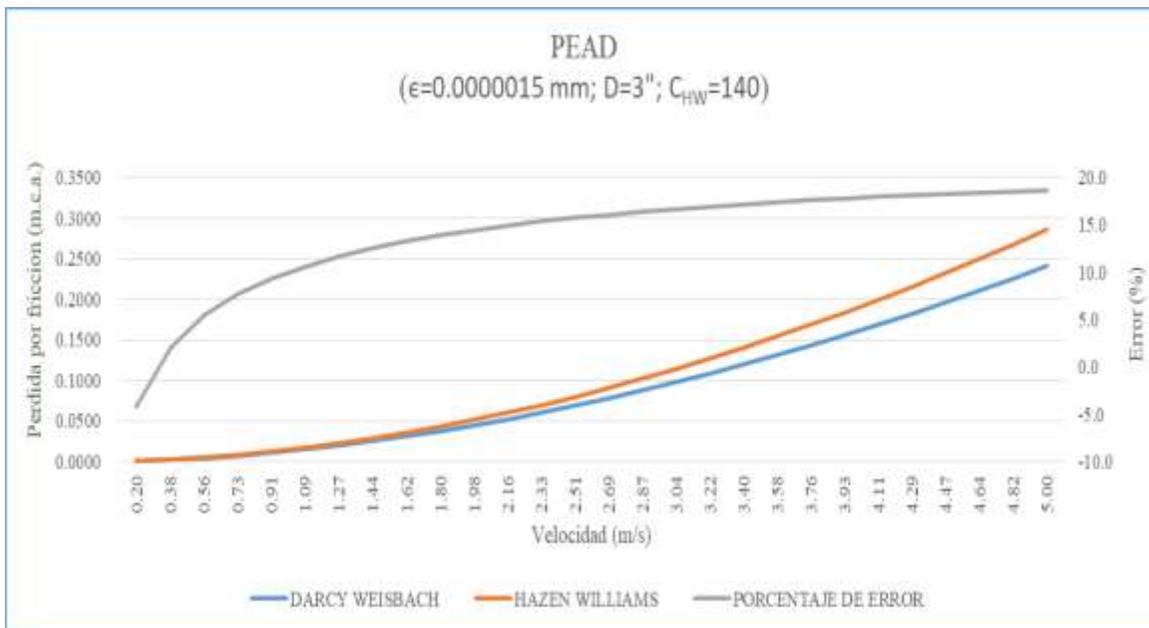


Figura 29: Variación en pérdidas por fricción tubería “PEAD; D=3”  
Fuente: Elaboración propia

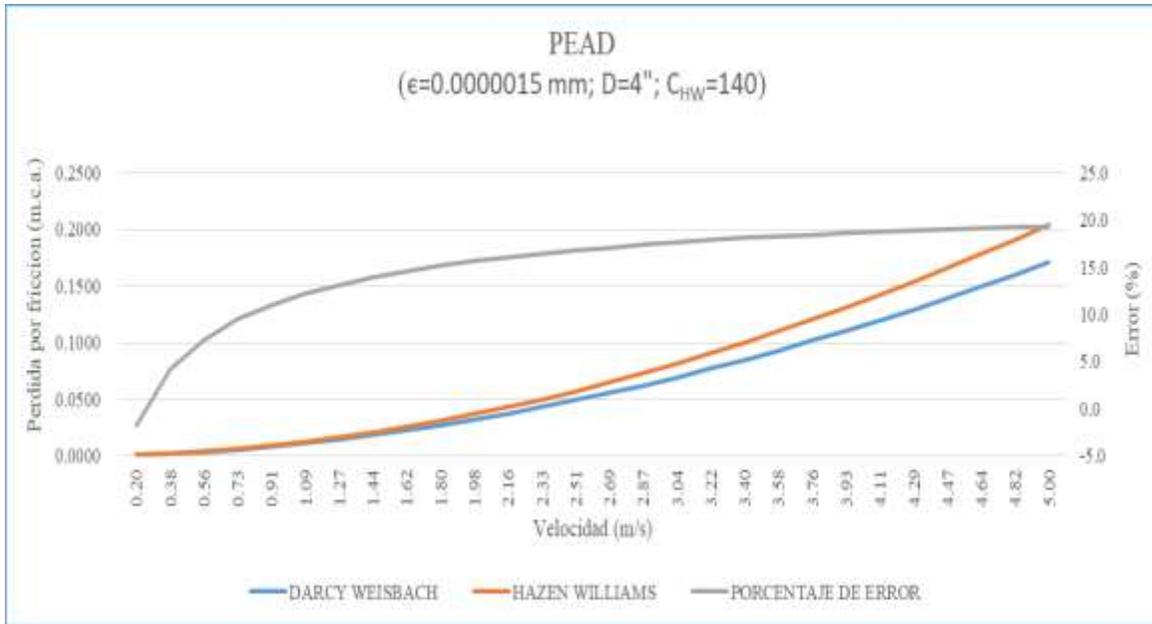


Figura 30: Variación en pérdidas por fricción tubería “PEAD; D=4”  
Fuente: Elaboración propia

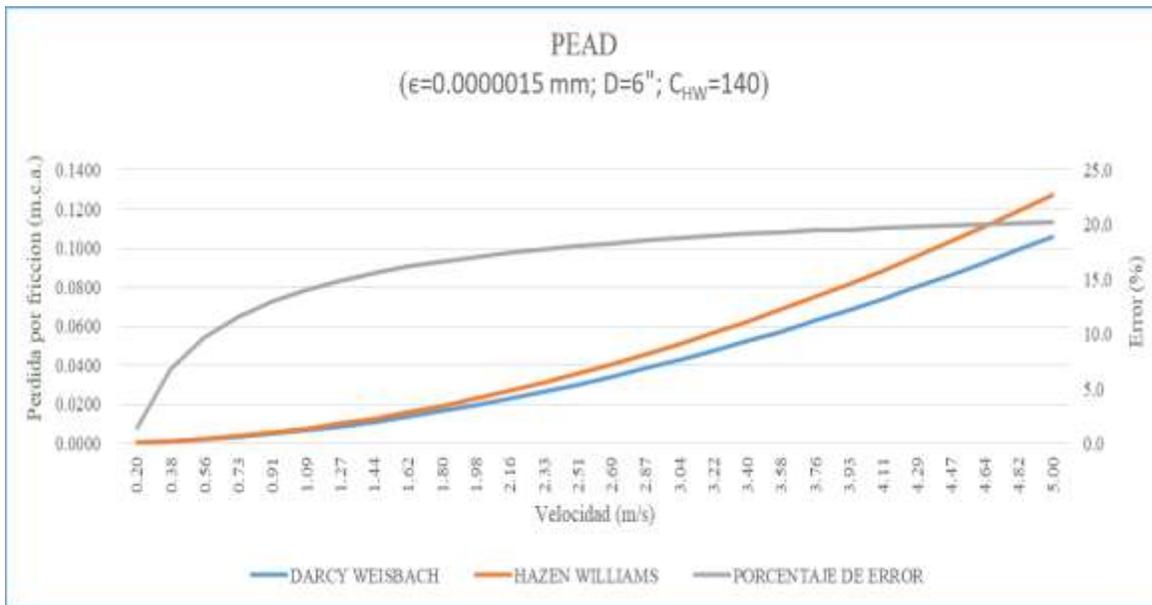


Figura 31: Variación en pérdidas por fricción tubería “PEAD; D=6”  
Fuente: Elaboración propia

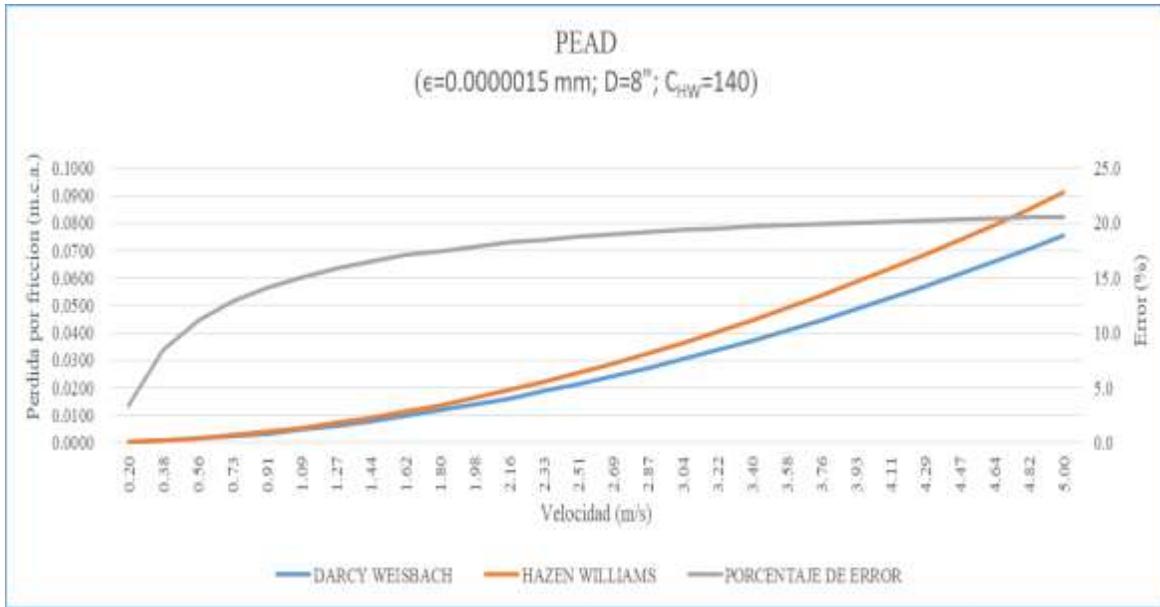


Figura 32: Variación en pérdidas por fricción tubería “PEAD; D=8”  
Fuente: Elaboración propia

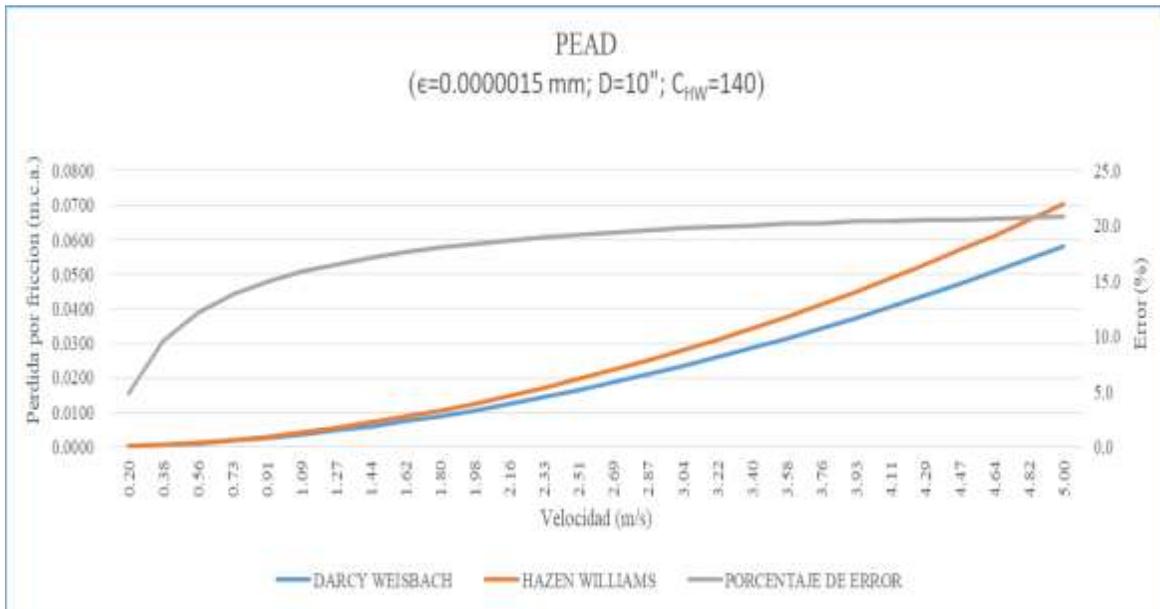


Figura 33: Variación en pérdidas por fricción tubería “PEAD; D=10”  
Fuente: Elaboración propia

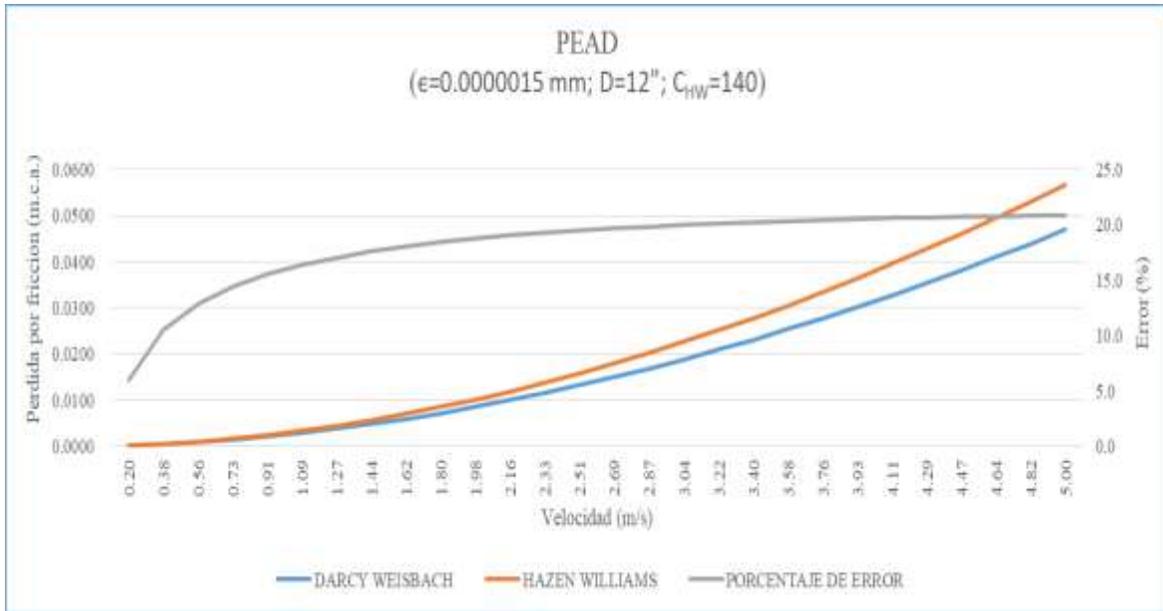


Figura 34: Variación en pérdidas por fricción tubería “PEAD; D=12”  
Fuente: Elaboración propia

En la siguiente tabla se plasma los porcentajes de sub estimación y sobre estimación que existe para tubería de PEAD en conducciones a presión a 15°C.

Tabla 23: Porcentaje de sub estimación y sobre estimación de pérdidas de carga para tubería PEAD

Diámetro	Velocidad (m/s)					
	0,2	1	2	3	4	5
1”	-14,9	3,3	8,3	11,4	13	14,3
2”	-7,8	8,2	12,5	15	16,3	17,3
3”	-4,2	10,6	14,4	16,7	17,8	18,7
4”	-1,8	12,2	15,7	17,7	18,6	19,3
6”	1,4	14	17	18,8	19,5	20,2
8”	3,4	14,1	17,9	19,4	20,1	20,6
10”	4,9	15	18,4	19,8	20,4	20,8
12”	6	16	18,8	20	20,6	20,9

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla anterior las variaciones que se generan son de consideración desde un -14,9% hasta un 20,9%.

Para FF se puede apreciar que el coeficiente de Hazen-Williams sugerido para estos materiales tiene un comportamiento descendente en relación a los anteriores 2 materiales y de igual manera el rango en el que debe trabajar el  $C_{hw}$  es muy amplio, podemos observar que para FF diámetros menores a 3” el  $C_{hw}$  en ningún momento alcanza los valores sugeridos en la literatura, es importante mencionar que independiente del tipo de material los coeficientes de Hazen-Williams sugeridos en la literatura no representan la variabilidad de los flujos laminar o turbulento, dado que para estos tipos de flujo no es posible trabajar con un valor lineal en el  $C_{hw}$  como se puede ver en la siguiente figura.

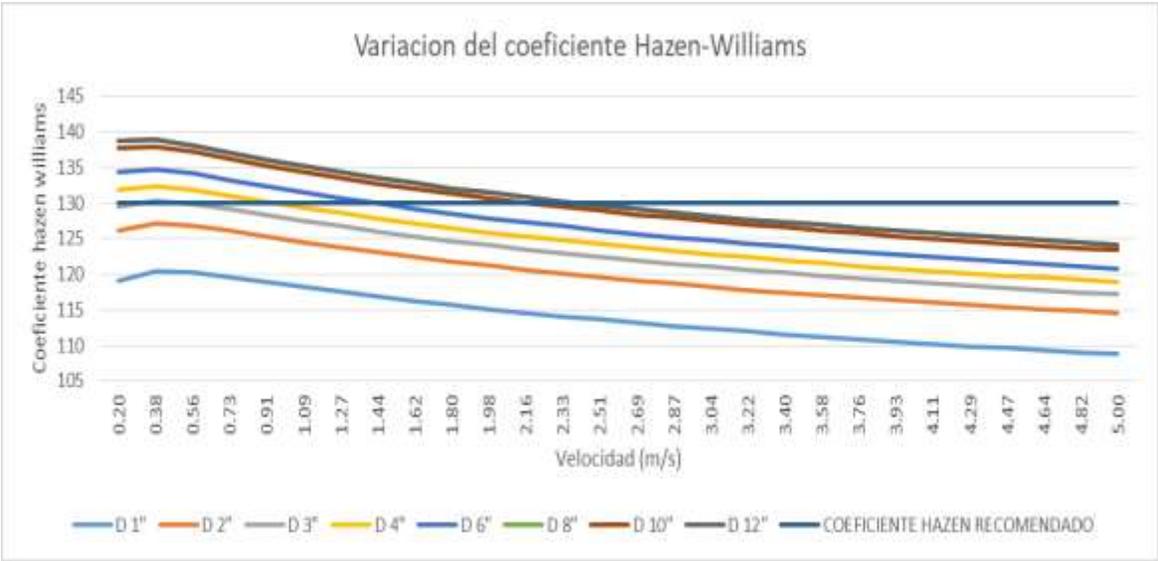


Figura 35: Variación del coeficiente Hazen – Williams para tubería “FF”  
 Fuente: Elaboración propia

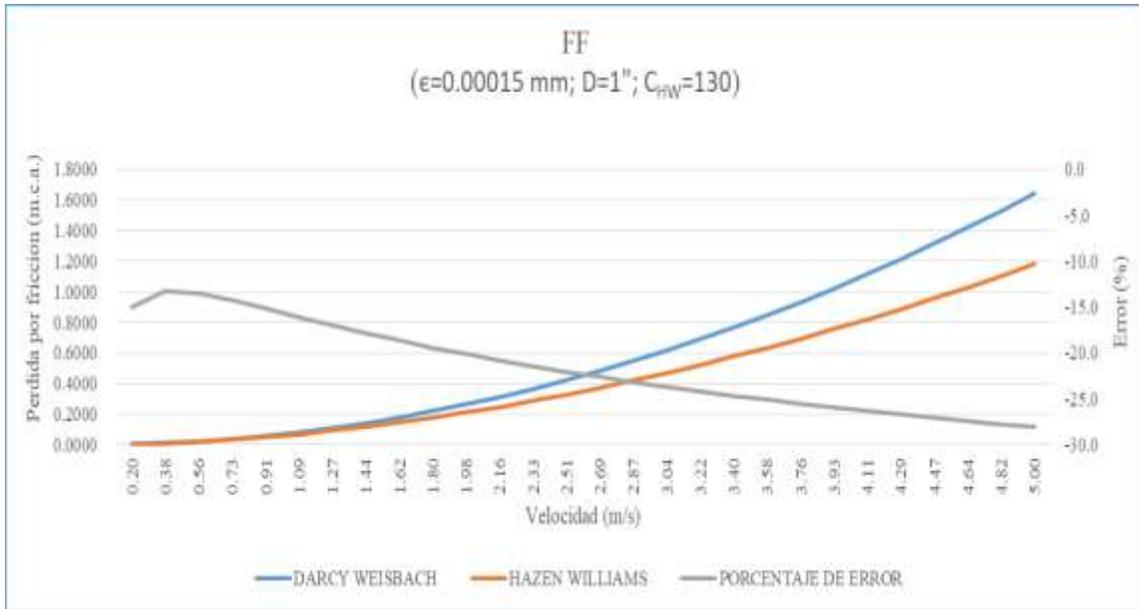


Figura 36: Variación en pérdidas por fricción tubería “FF; D=1”  
Fuente: Elaboración propia

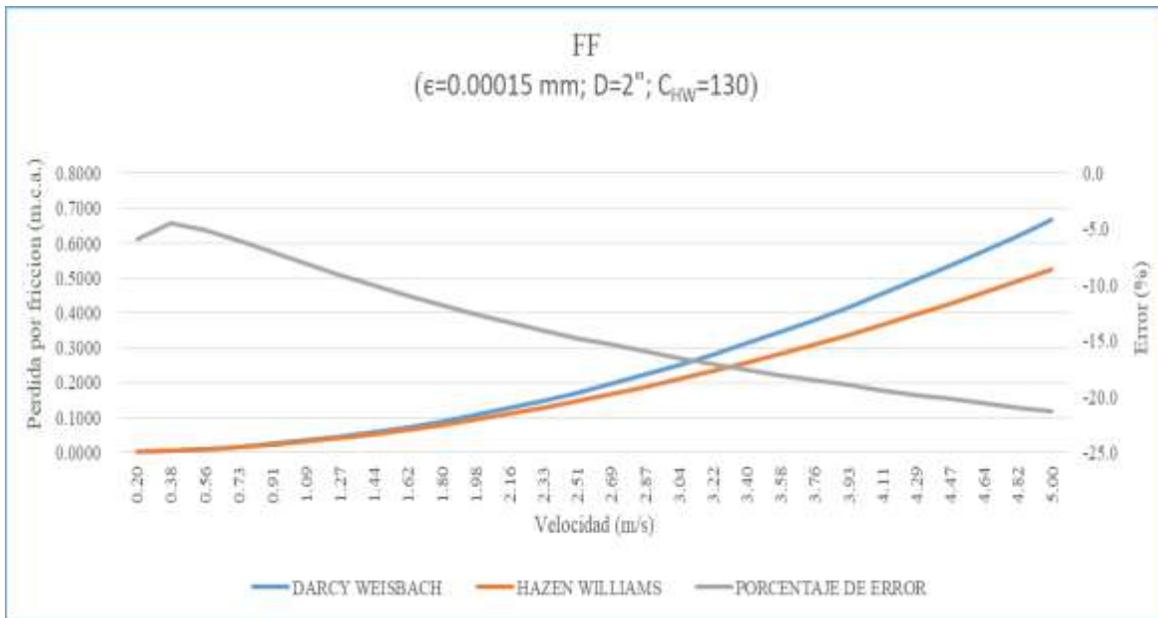


Figura 37: Variación en pérdidas por fricción tubería “FF; D=2”  
Fuente: Elaboración propia

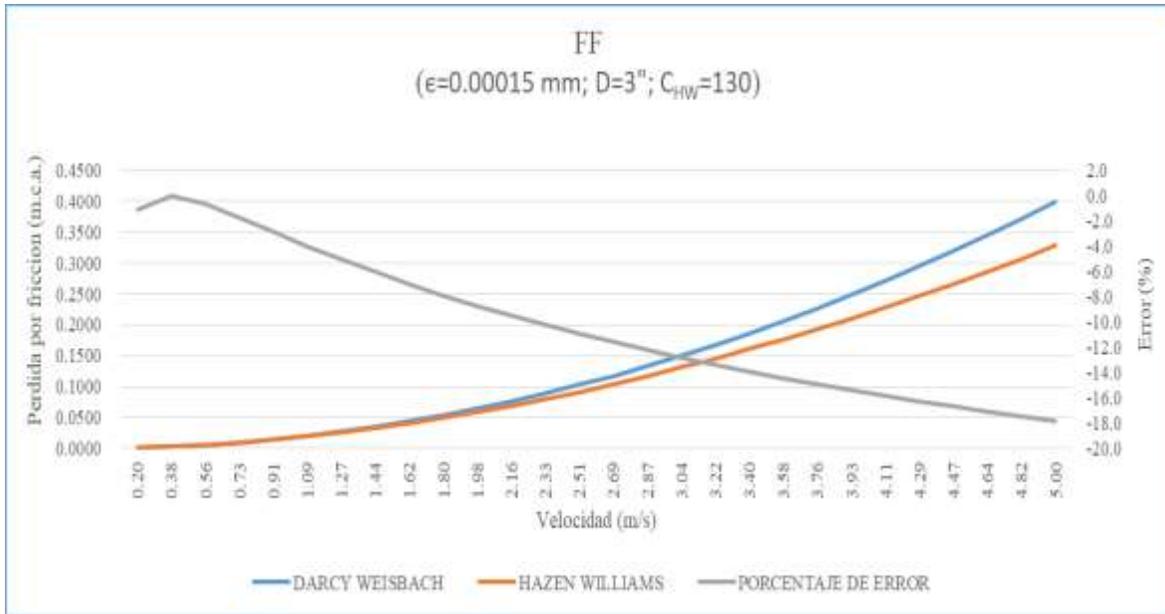


Figura 38: Variación en pérdidas por fricción tubería “FF; D=3”  
Fuente: Elaboración propia

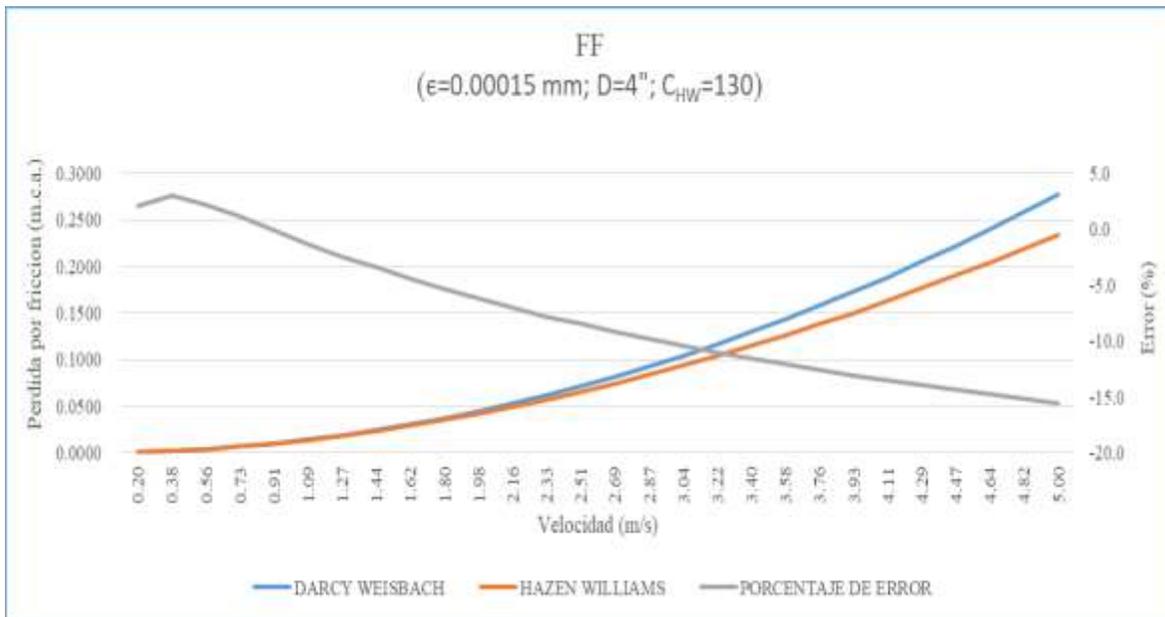


Figura 39: Variación en pérdidas por fricción tubería “FF; D=4”  
Fuente: Elaboración propia

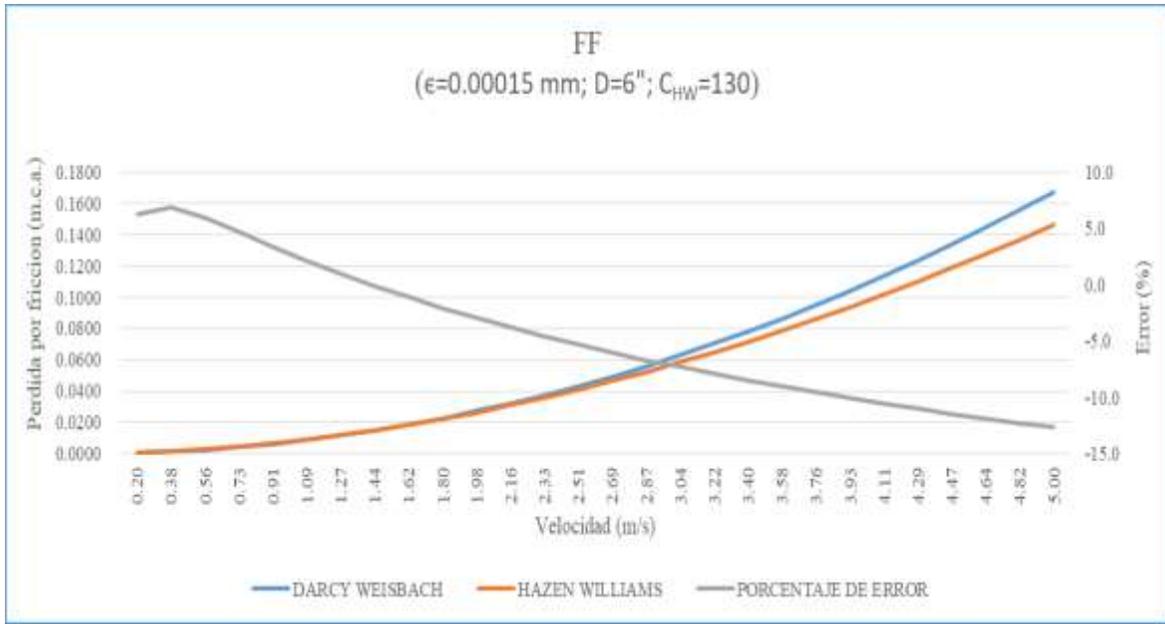


Figura 40: Variación en pérdidas por fricción tubería “FF; D=6”  
Fuente: Elaboración propia

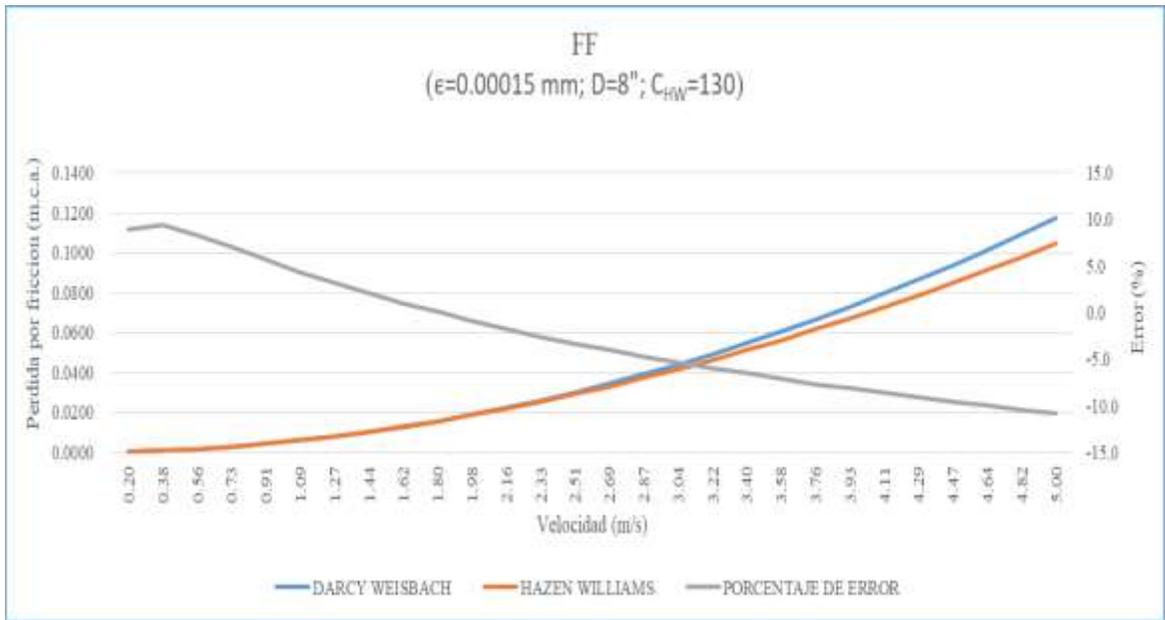


Figura 41: Variación en pérdidas por fricción tubería “FF; D=8”  
Fuente: Elaboración propia

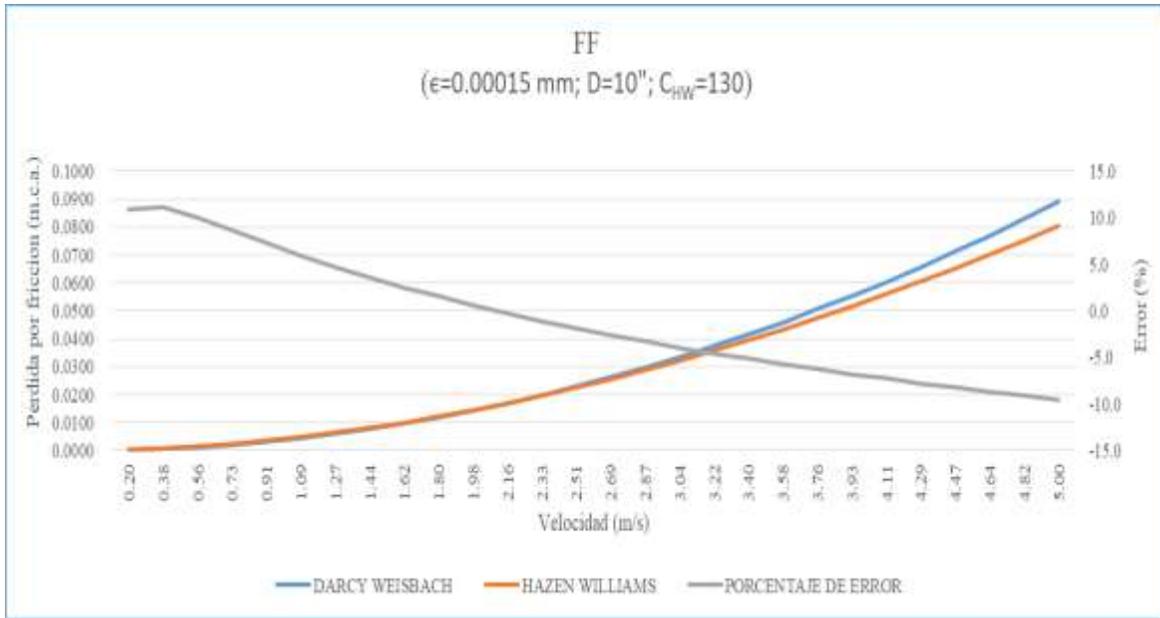


Figura 42: Variación en pérdidas por fricción tubería “FF; D=10”  
Fuente: Elaboración propia



Figura 43: Variación en pérdidas por fricción tubería “FF; D=12”  
Fuente: Elaboración propia

Tabla 24: Porcentaje de sub estimación y sobre estimación de pérdidas de carga para tubería FF

Diámetro	Velocidad (m/s)					
	0,2	1	2	3	4	5
1"	-15	-15,5	-20,1	-23,7	-26	-28,1
2"	-5,9	-7,5	-12,6	-16,5	-19,2	-21,3
3"	-1,1	-3,5	-8,7	-12,8	-15,6	-17,9
4"	2,1	-0,5	-6,2	-10,4	-13,3	-15,6
6"	6,2	2,8	-3,4	-7,1	-10,4	-12,7
8"	9	5	-0,9	-5,2	-8,5	-10,8
10"	10,9	6,7	0,6	-4	-7	-9,5
12"	12,4	7,9	1,7	-2,6	-6	-8,5

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla anterior las variaciones que se generan son de consideración desde un -28,1% hasta un 12,4%.

Para FFD se puede apreciar que el coeficiente de Hazen-Williams sugerido para estos materiales tiene un comportamiento descendente y de igual manera el rango en el que debe trabajar el  $C_{hw}$  es muy amplio.

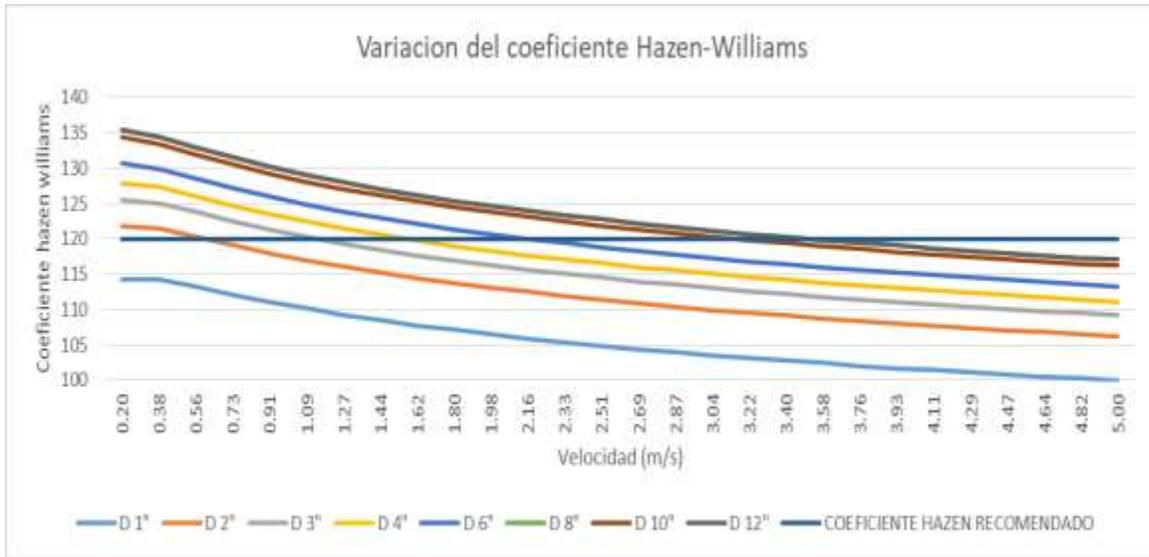


Figura 44: Variación del coeficiente Hazen – Williams para tubería “FFD”  
Fuente: Elaboración propia

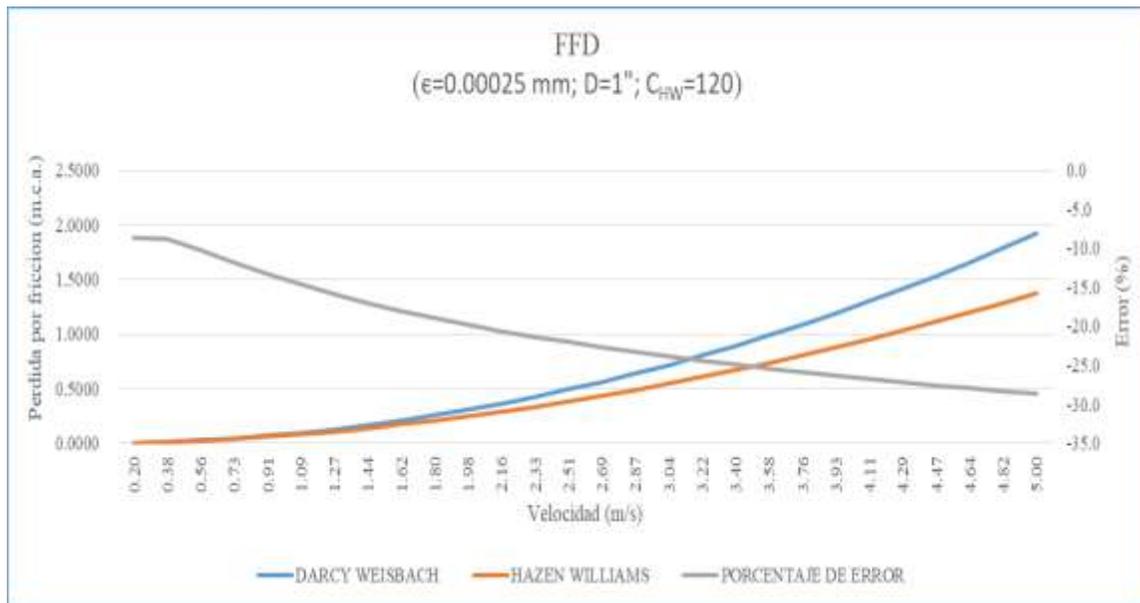


Figura 45: Variación en pérdidas por fricción tubería “FFD; D=1”  
Fuente: Elaboración propia

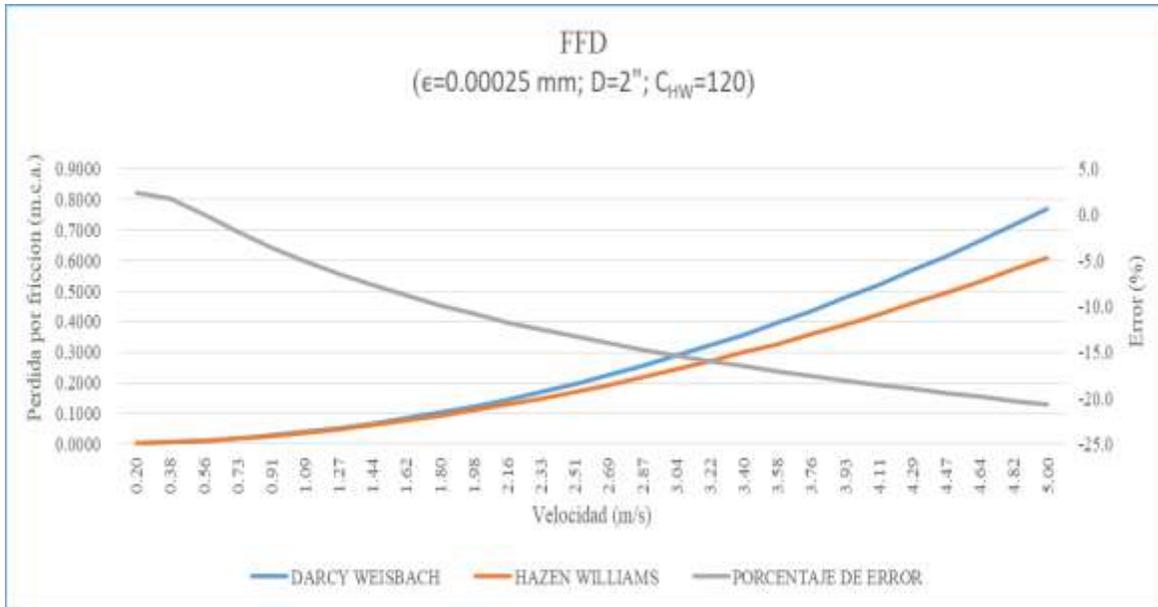


Figura 46: Variación en pérdidas por fricción tubería “FFD; D=2”  
Fuente: Elaboración propia

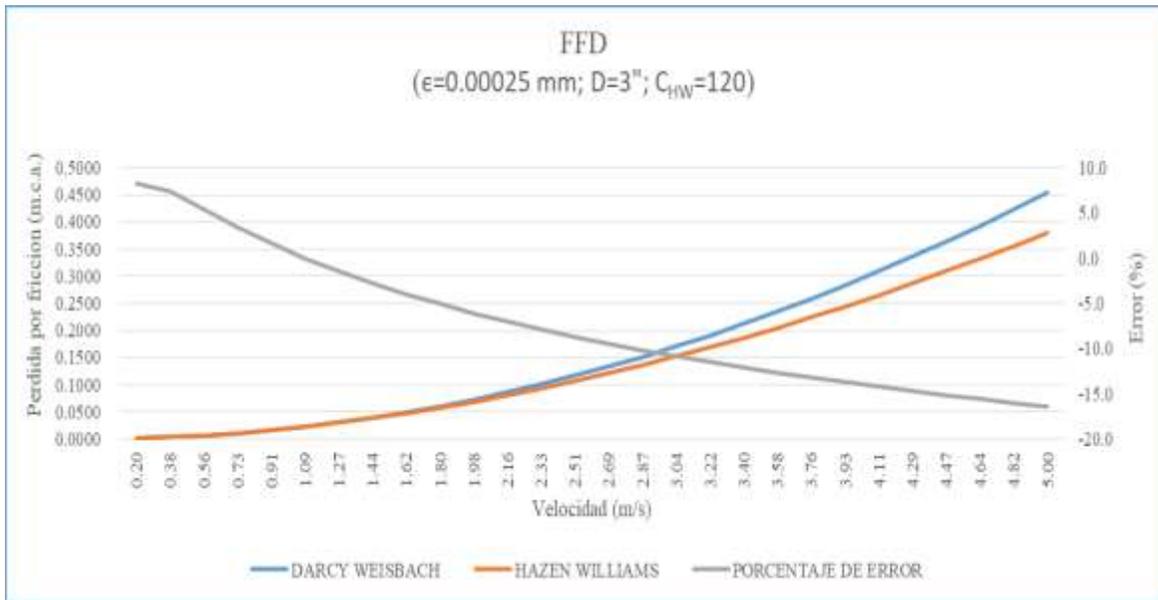


Figura 47: Variación en pérdidas por fricción tubería “FFD; D=3”  
Fuente: Elaboración propia

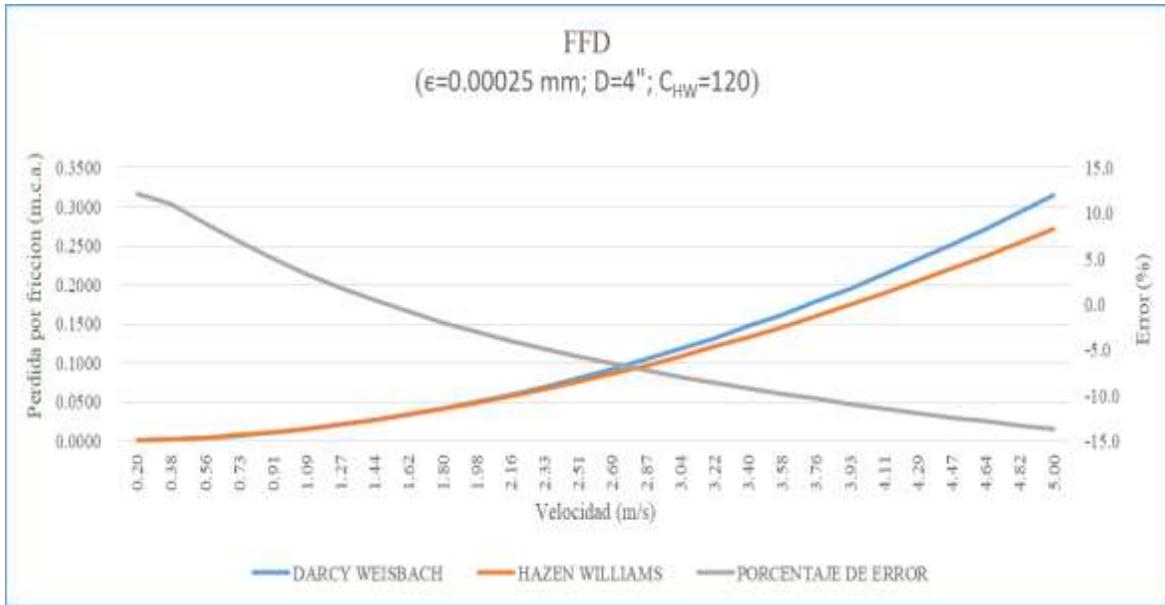


Figura 48: Variación en pérdidas por fricción tubería “FFD; D=4”  
Fuente: Elaboración propia

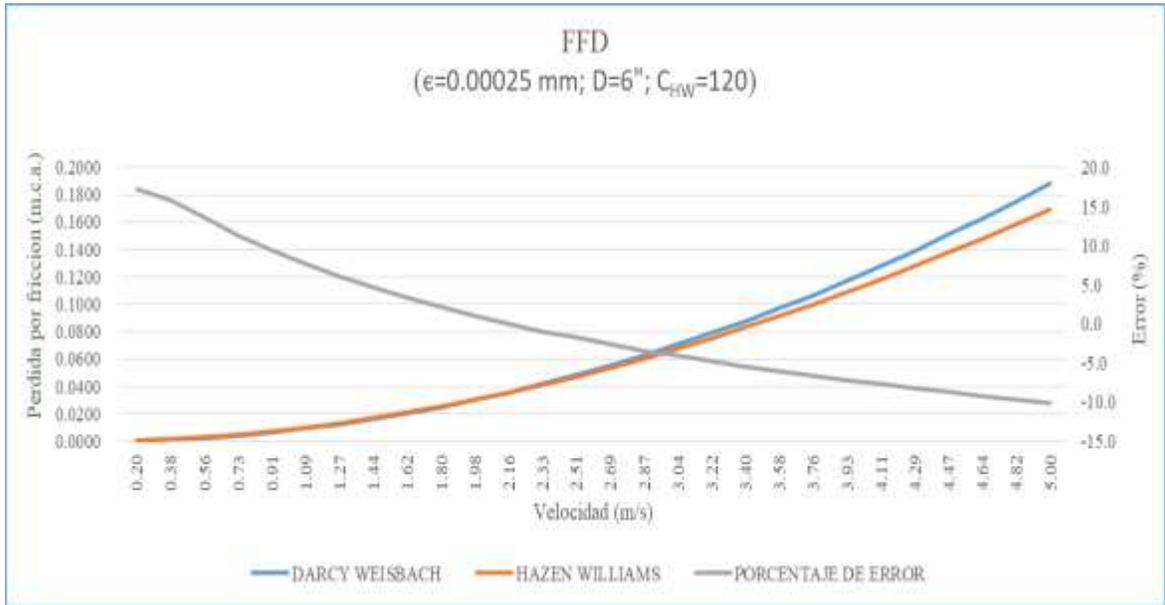


Figura 49: Variación en pérdidas por fricción tubería “FFD; D=6”  
Fuente: Elaboración propia

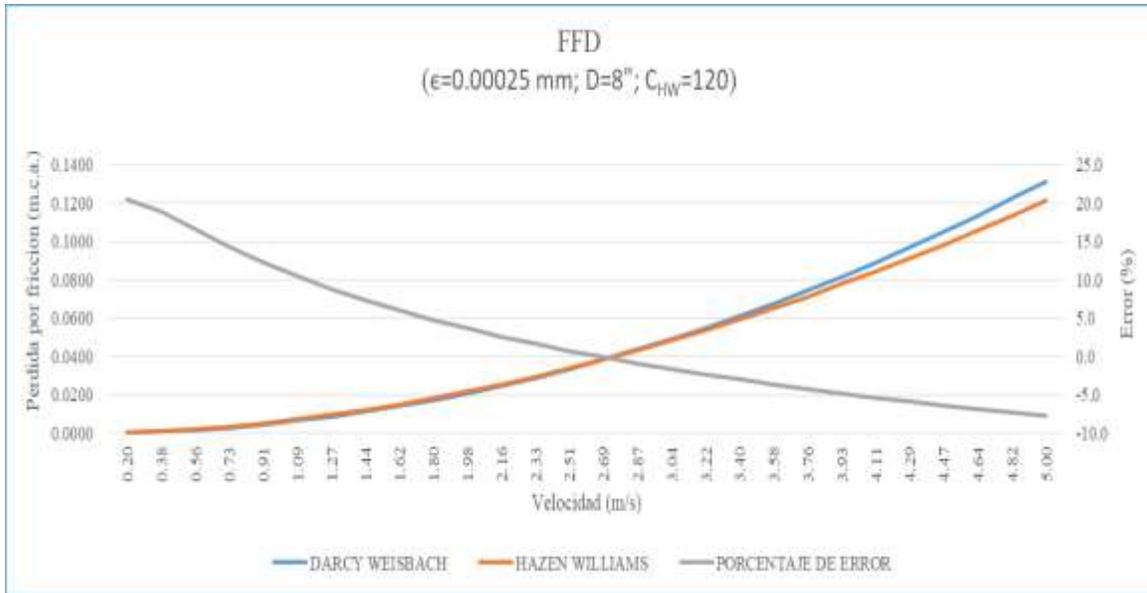


Figura 50: Variación en pérdidas por fricción tubería “FFD; D=8”  
Fuente: Elaboración propia

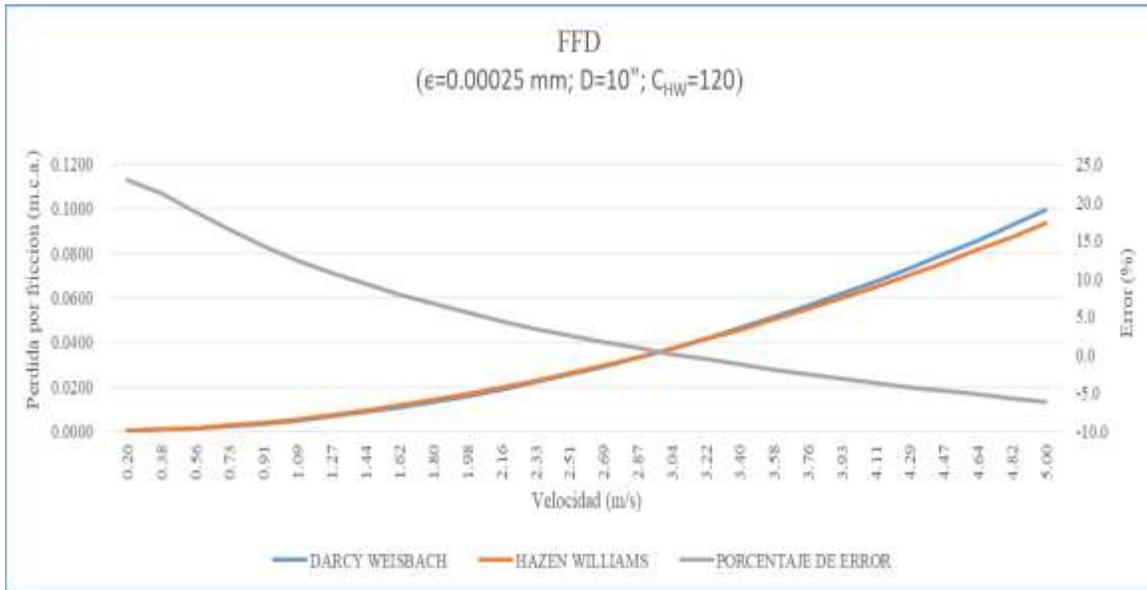


Figura 51: Variación en pérdidas por fricción tubería “FFD; D=10”  
Fuente: Elaboración propia

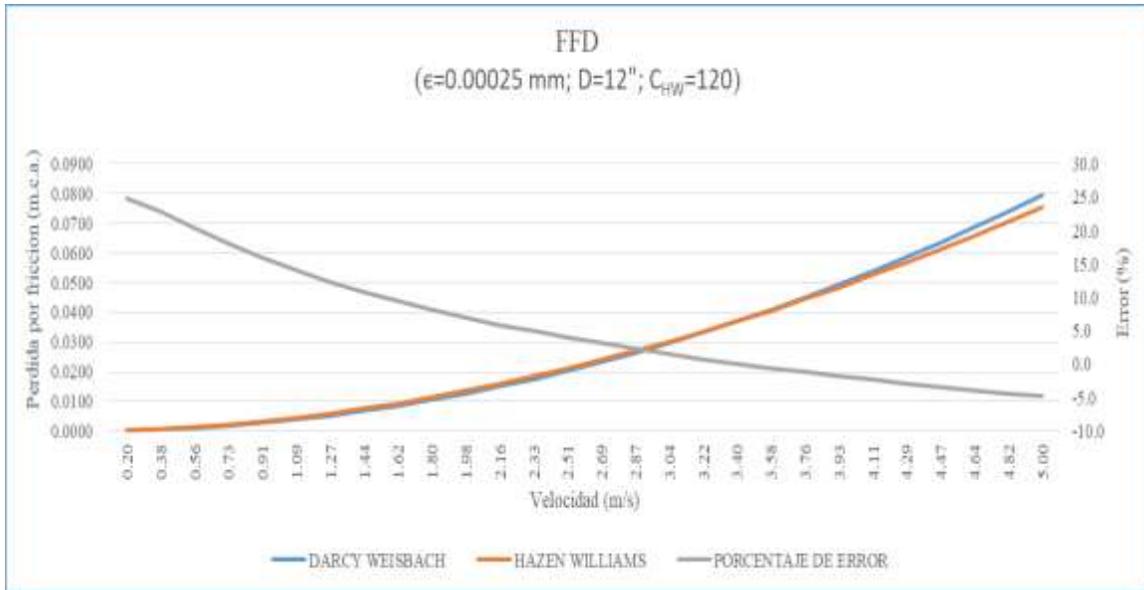


Figura 52: Variación en pérdidas por fricción tubería “FFD; D=12”  
Fuente: Elaboración propia

Tabla 25: Porcentaje de sub estimación y sobre estimación de pérdidas de carga para tubería FFD

Diámetro	Velocidad (m/s)					
	0,2	1	2	3	4	5
1”	-8,6	-13,9	-19,8	-23,9	-26,6	-28,6
2”	2,4	-4,3	-11	-15,1	-18,3	-20,6
3”	8,2	-0,8	-6,3	-10,5	-14,1	-16,5
4”	12,1	4	-3,2	-7,6	-11,1	-13,7
6”	17,2	8,5	-0,7	-4	-7,5	-10,1
8”	20,5	11,5	3,3	-1,1	-5,1	-7,8
10”	22,9	13,1	5,2	0,4	-3,4	-6,1
12”	24,8	15	6,5	1,9	-2,1	-4,8

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla anterior las variaciones que se generan son de consideración desde un -28,6% hasta un 24,8%.

Para FG se puede apreciar que el coeficiente de Hazen-Williams sugerido para estos materiales tiene un comportamiento descendente y de igual manera el rango en el que debe trabajar el  $C_{hw}$  es muy amplio.

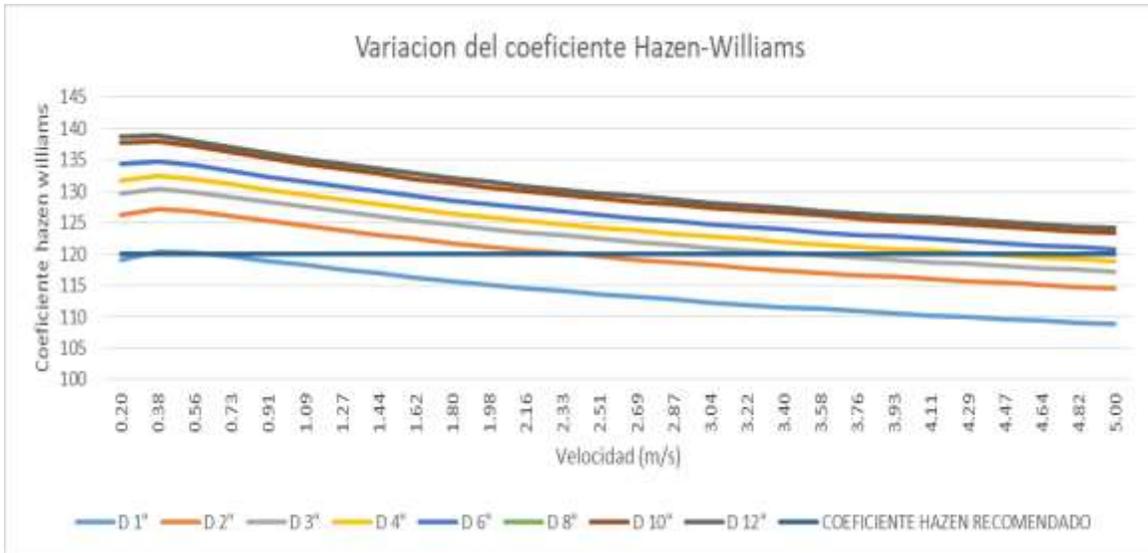


Figura 53: Variación del coeficiente Hazen – Williams ( $c$ ) para tubería “FG”  
Fuente: Elaboración propia

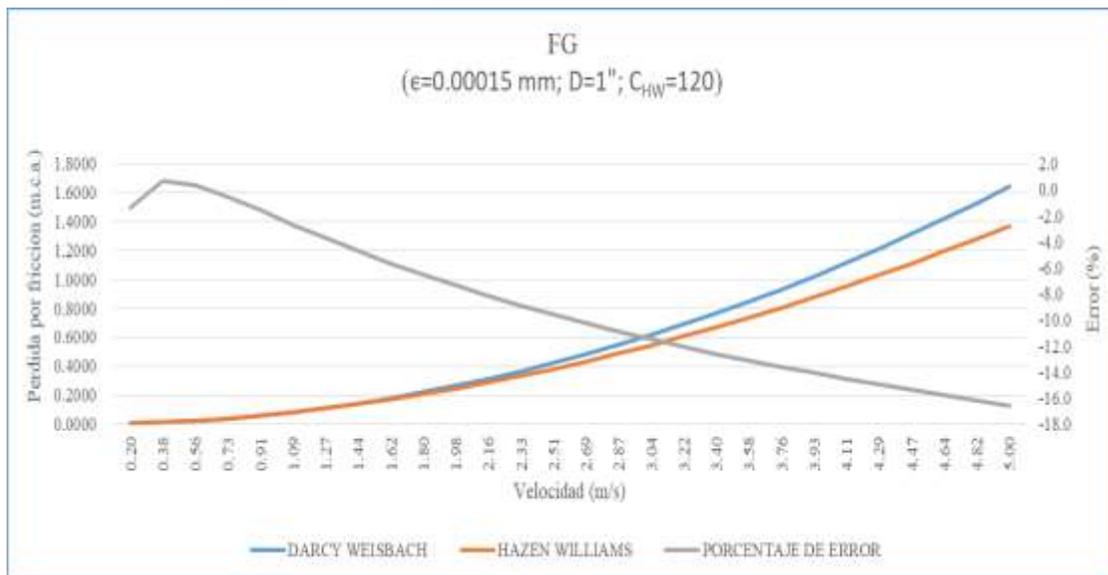


Figura 54: Variación en pérdidas por fricción tubería “FG; D=1”  
Fuente: Elaboración propia

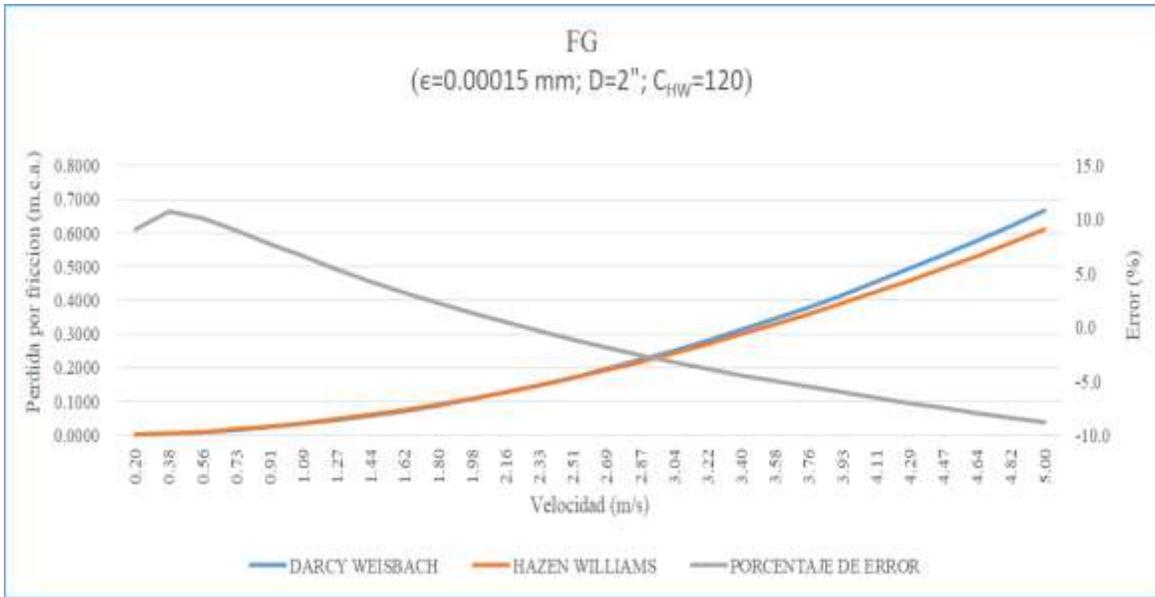


Figura 55: Variación en pérdidas por fricción tubería “FG; D=2”  
Fuente: Elaboración propia

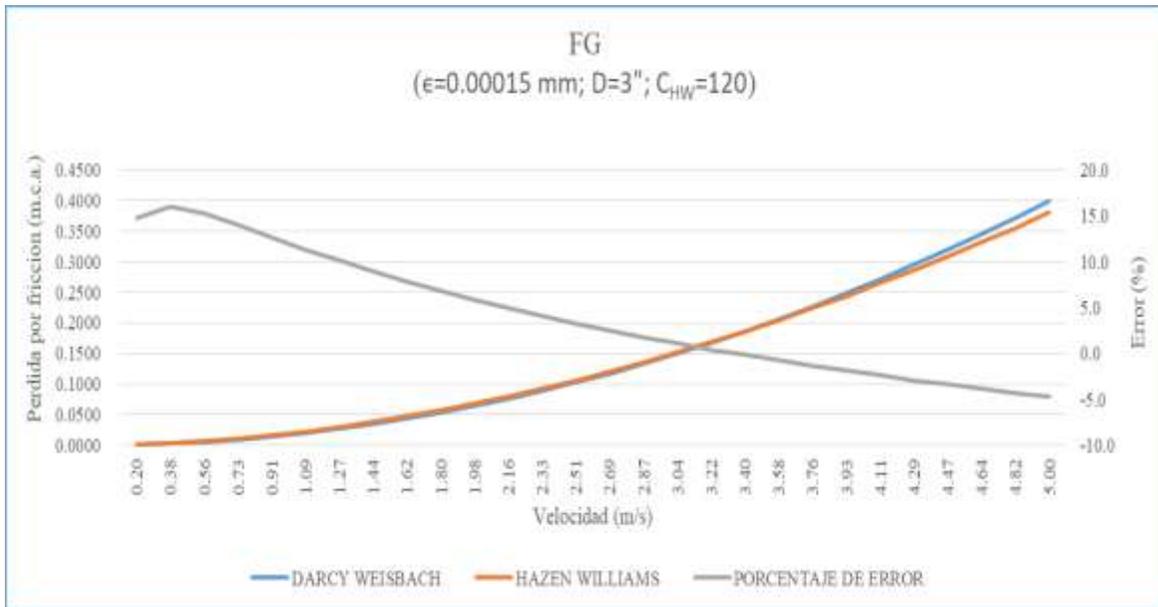


Figura 56: Variación en pérdidas por fricción tubería “FG; D=3”  
Fuente: Elaboración propia

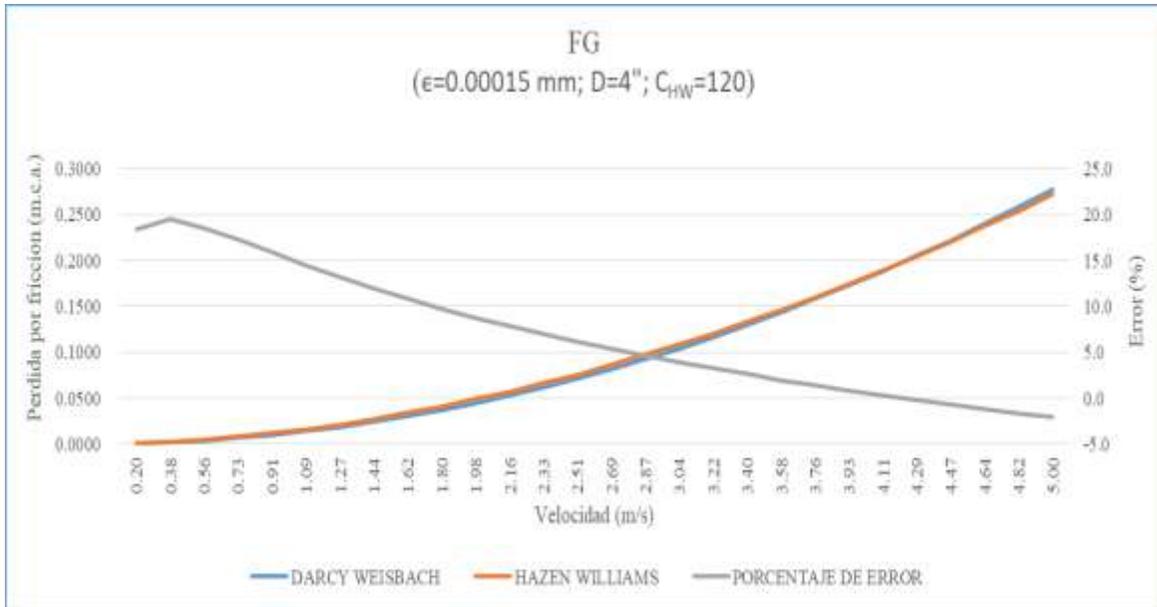


Figura 57: Variación en pérdidas por fricción tubería “FG; D=4”  
Fuente: Elaboración propia

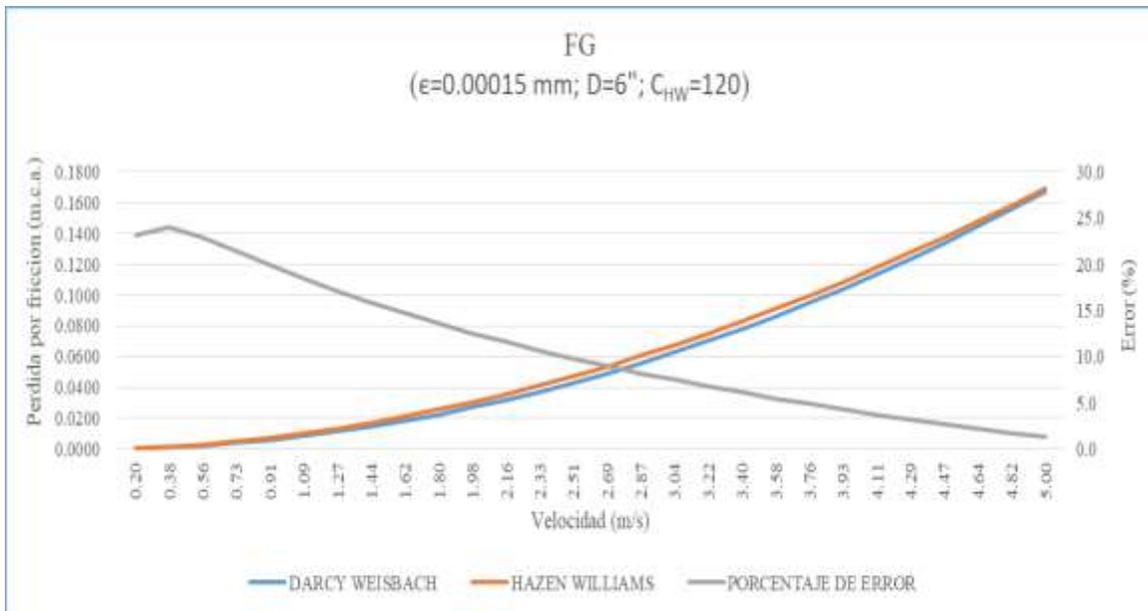


Figura 58: Variación en pérdidas por fricción tubería “FG; D=6”  
Fuente: Elaboración propia

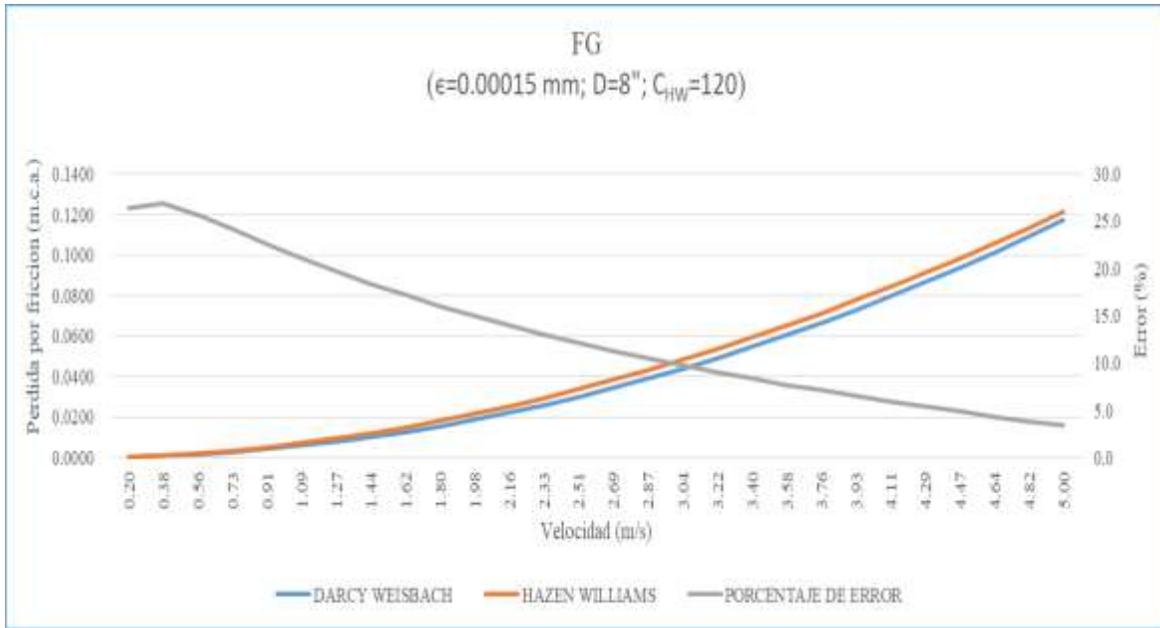


Figura 59: Variación en pérdidas por fricción tubería “FG; D=8”  
Fuente: Elaboración propia

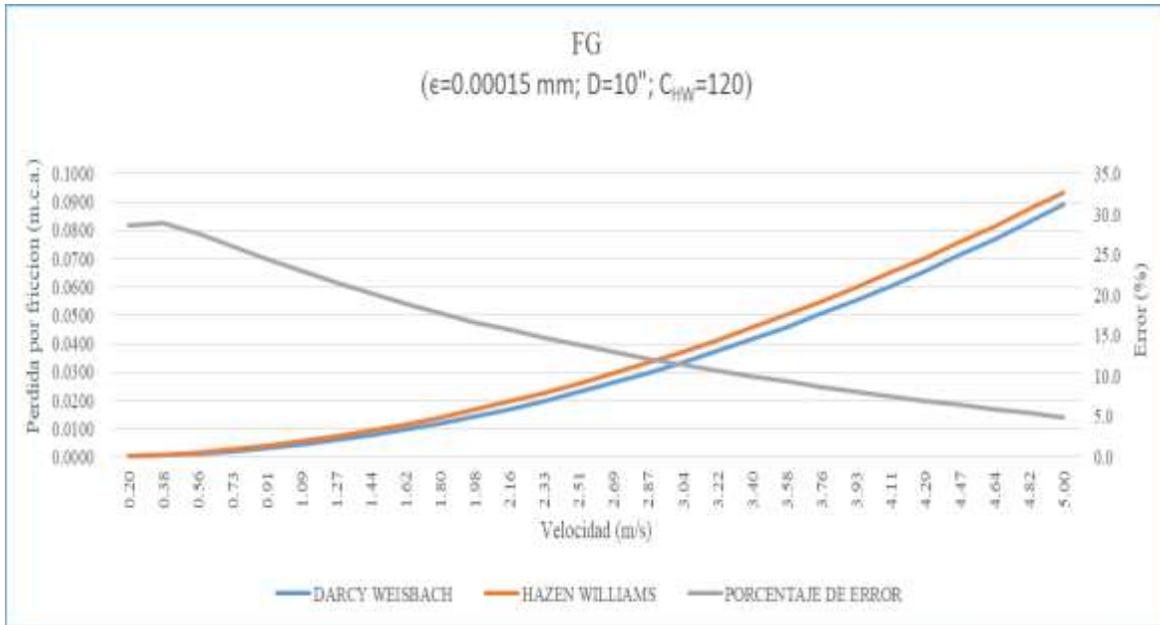


Figura 60: Variación en pérdidas por fricción tubería “FG; D=10”  
Fuente: Elaboración propia

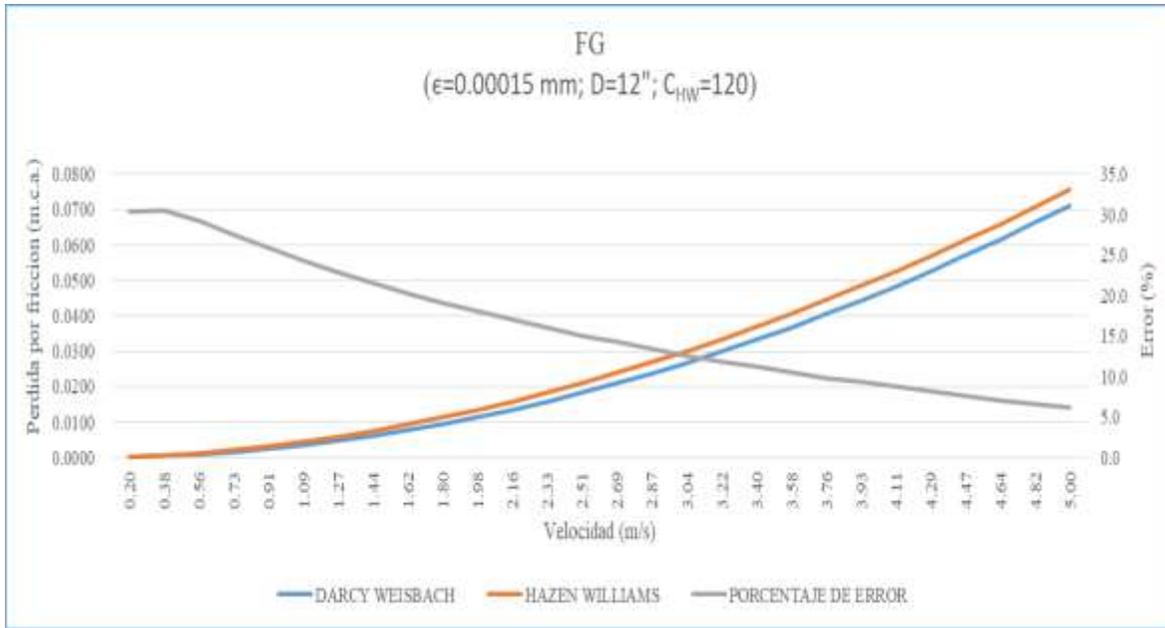


Figura 61: Variación en pérdidas por fricción tubería “FG; D=12”  
Fuente: Elaboración propia

Tabla 26: Porcentaje de sub estimación y sobre estimación de pérdidas de carga para tubería FG

Diámetro	Velocidad (m/s)					
	0,2	1	2	3	4	5
1”	-1,4	-2	-7,6	-11,3	-14,3	-16,6
2”	9,1	7,2	1,4	-3	-6,3	-8,8
3”	14,7	12	5,7	1,5	-2,2	-4,7
4”	18,4	15,3	8,6	4,1	0,6	-2,1
6”	23,2	19,1	12,3	7,8	4	1,3
8”	26,4	21,9	14,9	10	6,2	3,4
10”	28,6	23	16,4	11,6	7,8	4,9
12”	30,4	25	17,8	13	9	6,1

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla anterior las variaciones que se generan son de consideración desde un -16,6% hasta un 30,4%.

Al observar los gráficos obtenidos podemos indicar 3 características:

- A mayor velocidad mayor es el error de pérdida de carga con la ecuación de Hazen – Williams para tuberías de PVC y PEAD (sobre estimación).
- A menor velocidad mayor es el error de pérdida de carga con la ecuación de Hazen – Williams para tuberías de FF, FFD y FG (sobre estimación).
- Se registra sub estimación en tubería PVC y PEAD solo en velocidades y diámetros pequeños.
- Se registra sub estimación en tubería FF, FFD y PEAD en velocidades altas y menor sea el diámetro, mayor es la sub estimación.
- A mayor temperatura la sobre estimación de pérdida de carga con la ecuación de Hazen - Williams es mayor.

Cabe mencionar que observando las gráficas anteriores, se realizó gráficas de las pérdidas por fricción a diferentes temperaturas del agua que circula en las tuberías solo con fines de poder observar si este parámetro afecta en gran manera a las pérdidas de carga por fricción y así poder tomarlo en cuenta, una vez realizadas estas graficas podemos concluir que a mayor temperatura la diferencia de pérdidas son mayores para tuberías de PVC y PEAD, y para tuberías de FF, FFG y FG las diferencias de pérdidas son mayores a menor velocidad, estas diferencias no son de relevancia para las perdidas por fricción además que es bastante dificultoso definir solo una temperatura de trabajo debido que durante un día tenemos muchas variaciones, por lo que la temperatura no es factor a tomar en cuenta para el cálculo de pérdidas por fricción a menos que sean casos específicos donde se deban manejar fluidos a temperaturas fuera de lo habitual.

A modo de poder observar de mejor manera la diferencia de pérdidas se generaron gráficas donde podemos observar el comportamiento de las ecuaciones a distintas temperaturas, se plantea un escenario para tubería PVC, PEAD, FF, FFD y FG a una velocidad de 3 m/s a distintas longitudes de tubería.

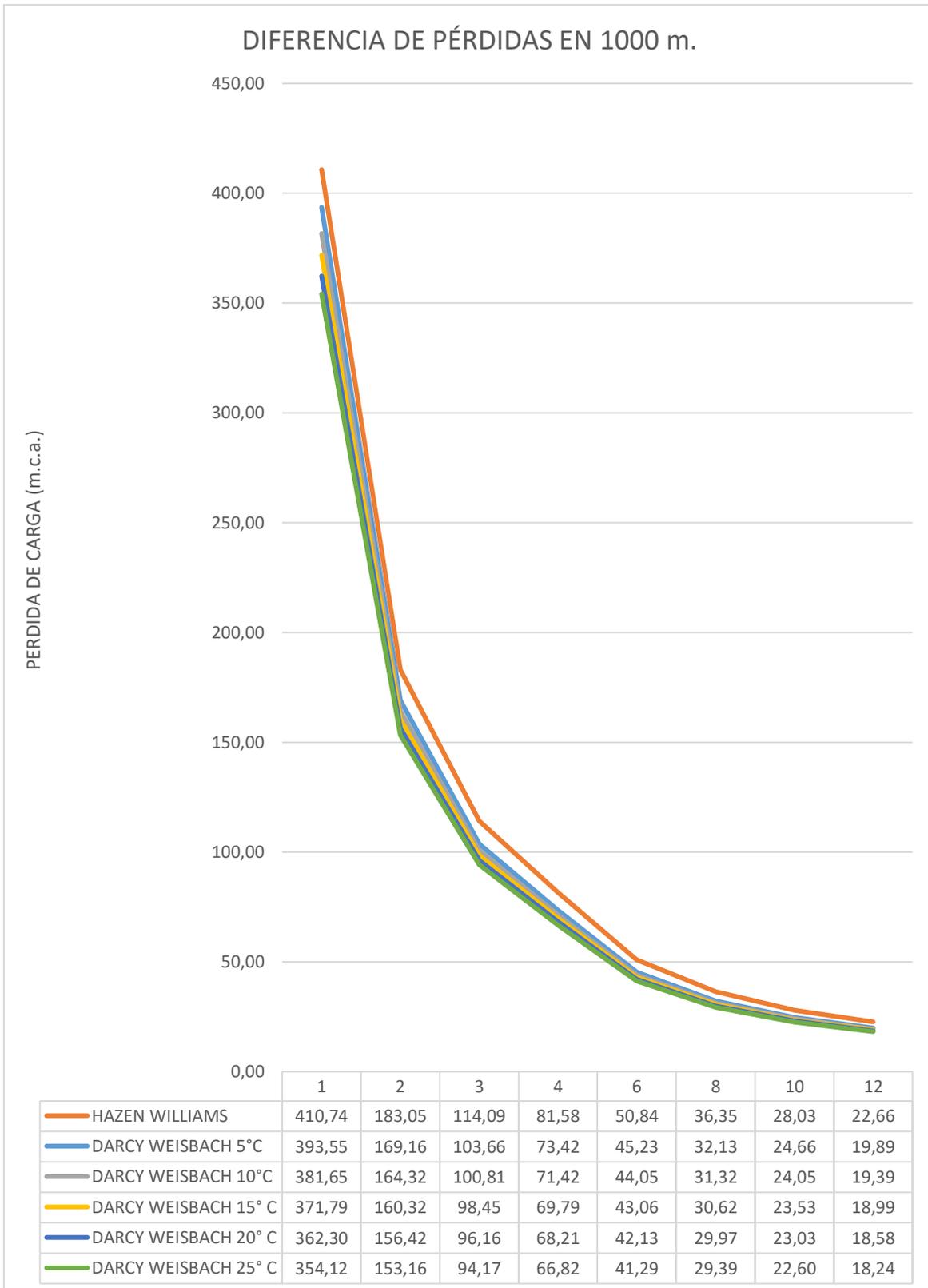


Figura 62: Diferencia en pérdidas por fricción para tubería "PVC" en 1000 m.

Fuente: Elaboración propia

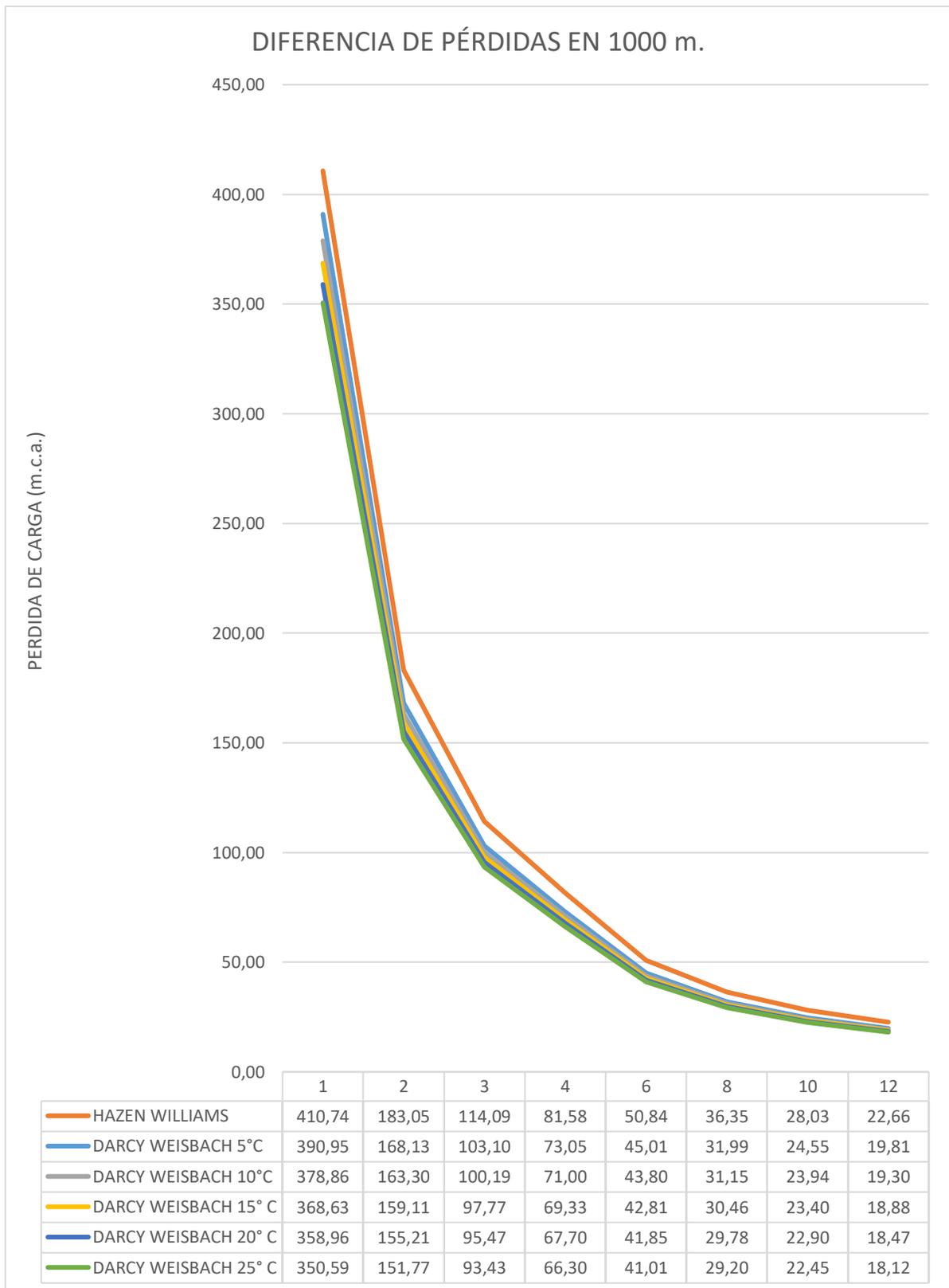
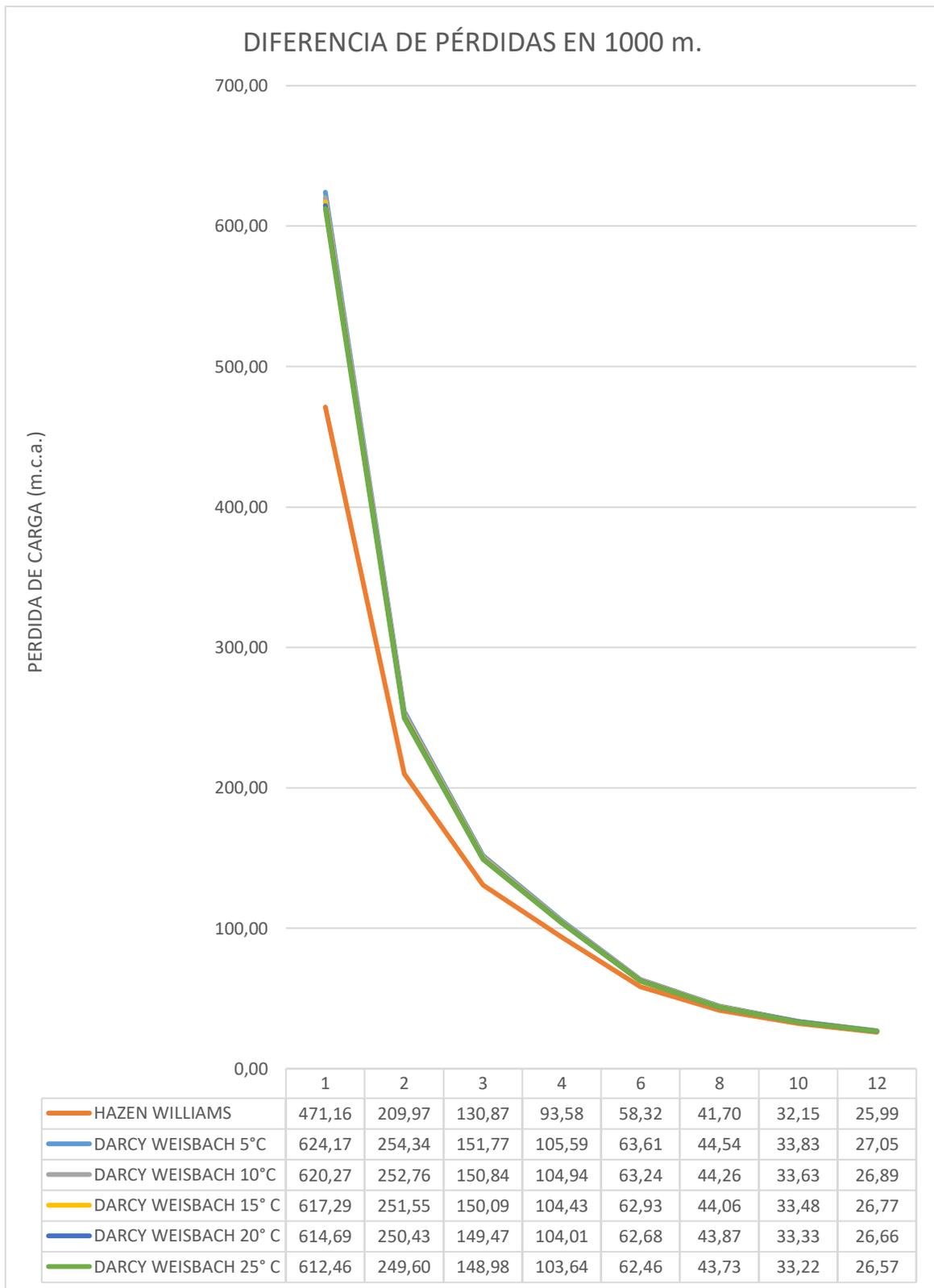


Figura 63: Diferencia en pérdidas por fricción para tubería “PEAD” en 1000 m.

Fuente: Elaboración propia



*Figura 64: Diferencia en pérdidas por fricción para tubería "FF" en 1000 m.*  
Fuente: Elaboración propia

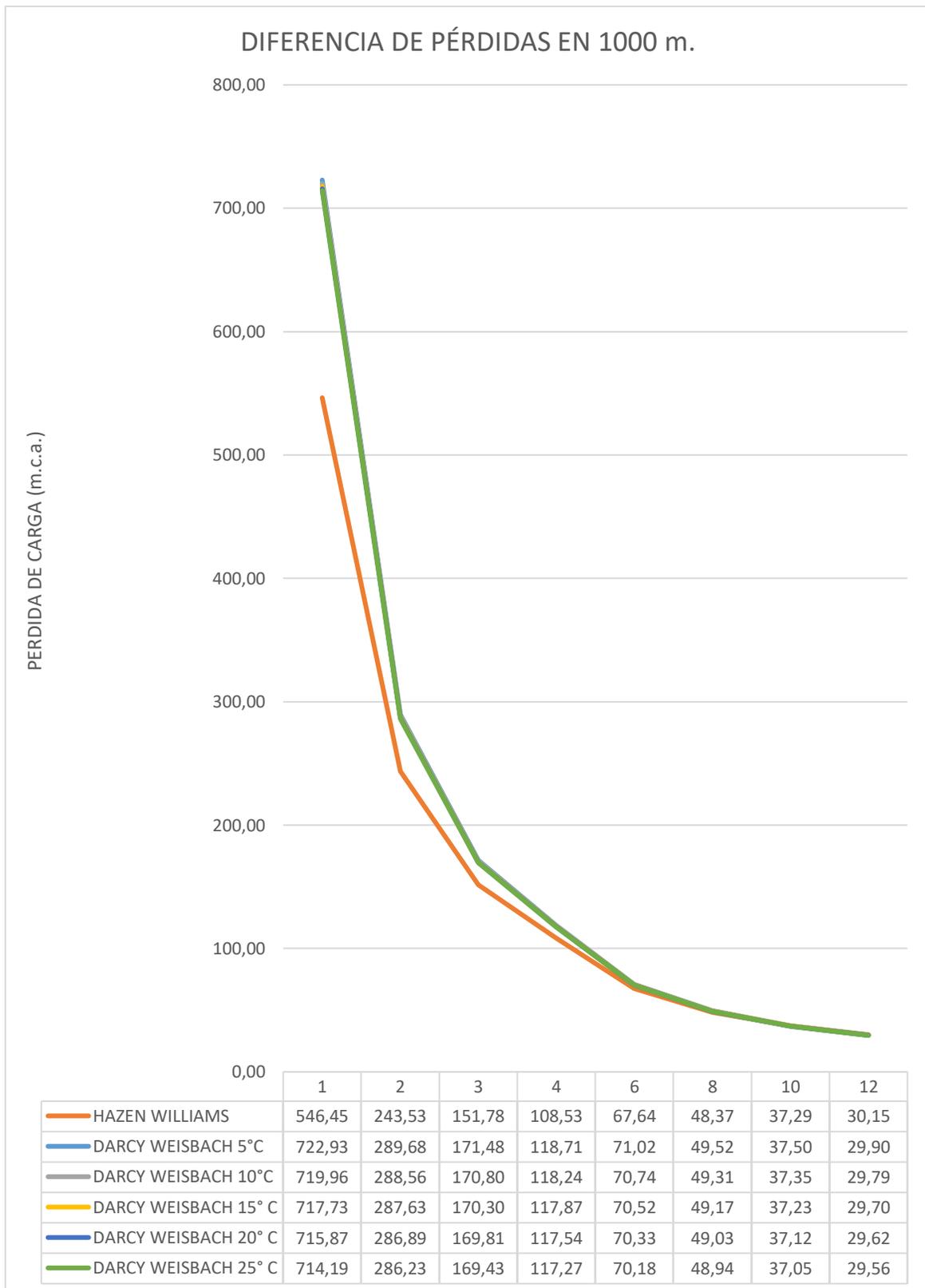
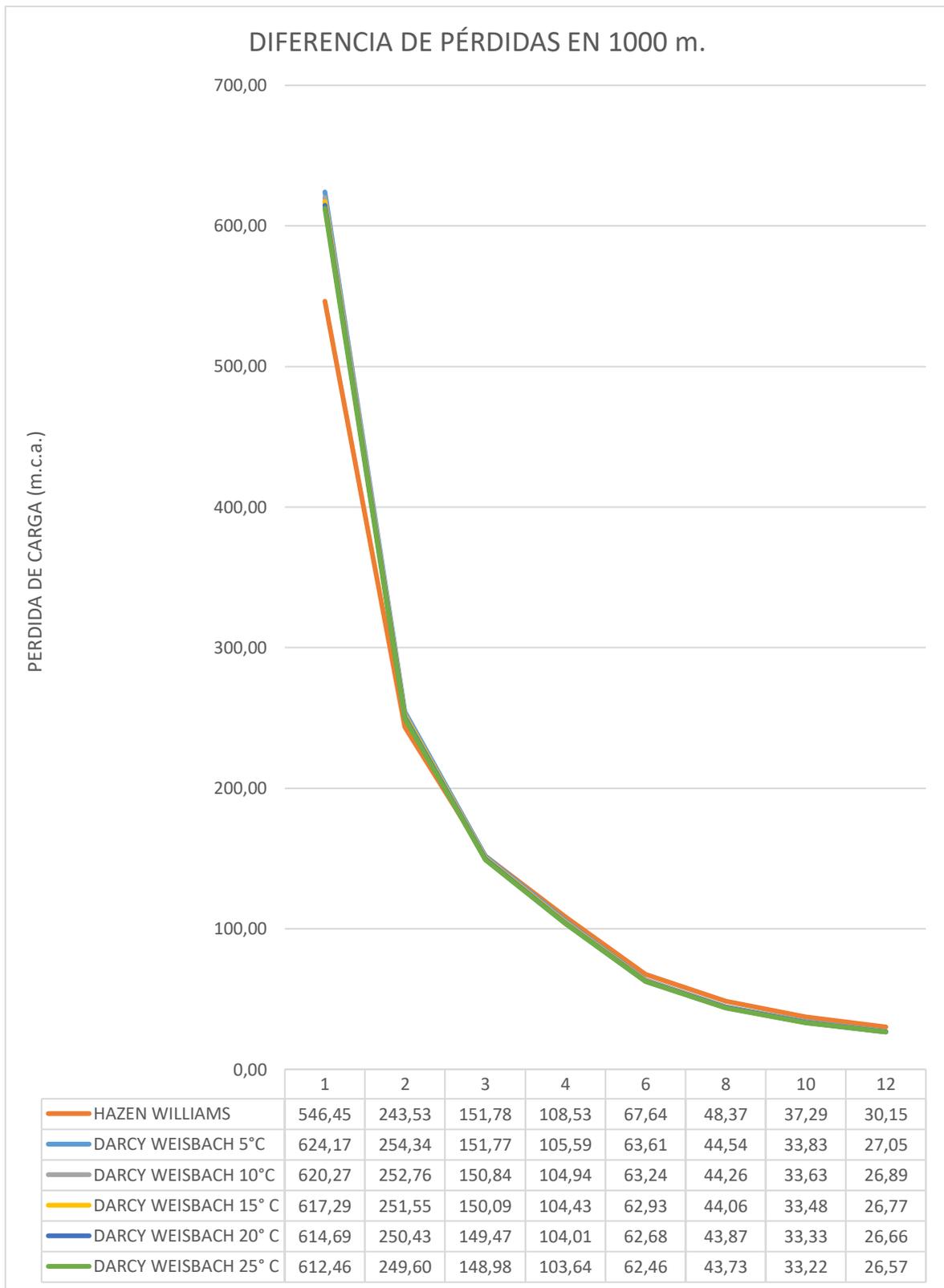


Figura 65: Diferencia en pérdidas por fricción para tubería “FFD” en 1000 m.

Fuente: Elaboración propia



*Figura 66: Diferencia en pérdidas por fricción para tubería "FG" en 1000 m.*

Fuente: Elaboración propia

Se debe mencionar que la sobre estimación de pérdidas que produce la ecuación de Hazen-Williams puede generar la sobre estimación de diámetros a momento de encarar un diseño de una conducción de agua, es por eso que deben plantear límites de aplicabilidad a la ecuación de Hazen-Williams.

Observando estas comparaciones podemos indicar que la ecuación de Hazen-Williams no evalúa apropiadamente el efecto de cada uno de los factores que inciden en la pérdida de energía por fricción de una tubería, en cambio la ecuación de Darcy-Weisbach es una de las pocas expresiones que agrupan estos factores y por tanto la ventaja de esta es que puede aplicarse a todos los tipos de flujo hidráulico (laminar, transicional y turbulento) por lo que se recomienda ampliamente el uso de esta ecuación además de que nos permite trabajar con otro tipo de líquidos o agua a una temperatura fuera de lo habitual, la simplicidad del uso de la ecuación de Hazen-Williams es innegable en comparación a la ecuación de Darcy-Weisbach más aun cuando no se cuenta con la posibilidad de acceder a un computador, es por este motivo que la ecuación de Hazen - Williams ganó popularidad ampliamente en relación a la ecuación de Darcy-Weisbach pero dado al avance tecnológico y la portabilidad con la que hoy en día cuentan los computadores no hay excusa alguna para no usar la ecuación de Darcy-Weisbach y el uso de la ecuación de Hazen-Williams se debe limitar solo cuando sea estrictamente necesario.

#### **4.2.2 Analisis de la variación del coeficiente de Hazen-Williams**

Realizaremos un análisis del coeficiente de Hazen –Williams pero a manera de poder realizar un mejor análisis agruparemos los diámetros en 3 grupos:

- Diámetros menores: 1” y 2”
- Diámetros intermedios 3”, 4”, 6” y 8”
- Diámetros mayores 10”y 12”

Como se observa en la figuras 67, 68, 69, 70 y 71 concluimos que:

- Se observa mayor variación en los diámetros menores, en todos los materiales analizados se observa que los diámetros de 1” y 2” en cualquier rango de velocidad se encuentran con una mayor variación que los demás como era de esperarse debido a las limitaciones

de la fórmula de Hazen-Williams, es por eso que no se aconseja el uso de una coeficiente constante para estos diámetros debido a la gran variación que presentan en su comportamiento.

- Para los diámetros intermedios podemos indicar que se comportan de manera más agrupada, la variación en relación a su velocidad es similar entre todos los diámetros pero estos se encuentran más agrupados entre ellos.
- Para lo diámetros mayores podemos indicar que se comportan de manera aún más agrupada hasta incluso podemos decir que los coeficientes de Hazen-Williams se fusionan entre ellos.

Analizaremos el comportamiento del coeficiente de Hazen-Williams para PVC y PEAD debido a las similitudes que hay en su variación.

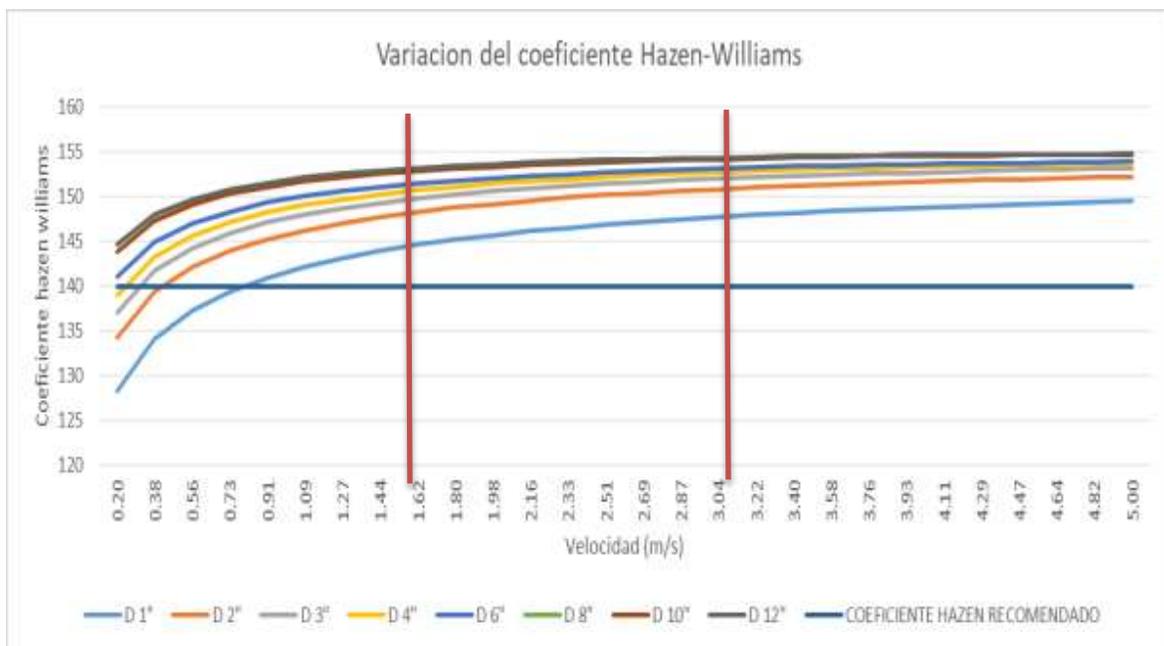
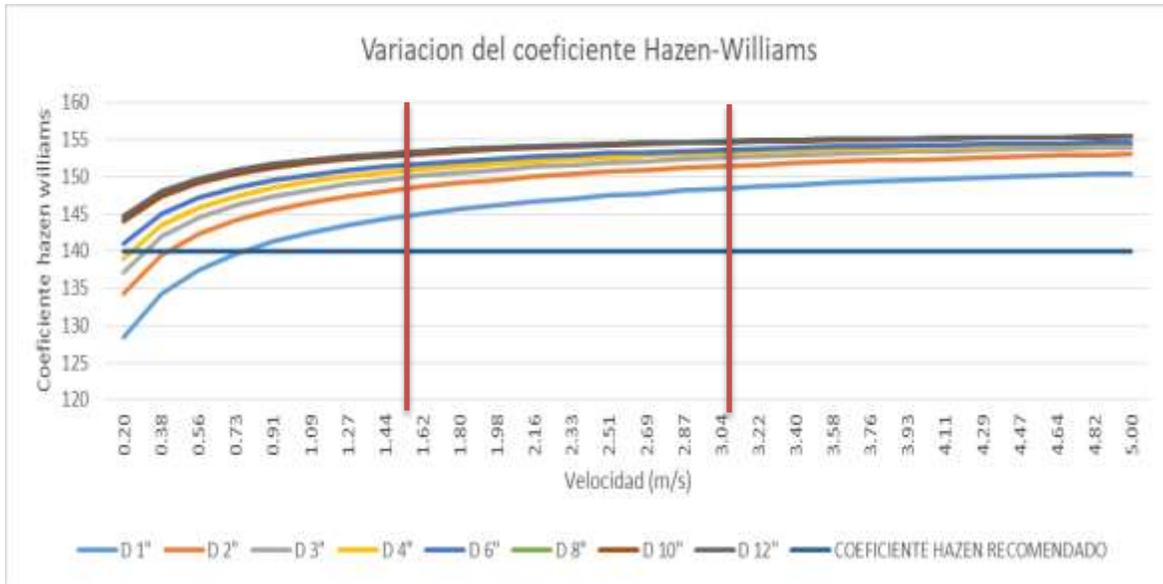


Figura 67: Variación del coeficiente Hazen – Williams para tubería “PVC”

Fuente: Elaboración propia



*Figura 68: Variación del coeficiente Hazen – Williams para tubería “PEAD”*  
Fuente: Elaboración propia

Si observamos las figuras 69 y 70 podemos advertir que el comportamiento del coeficiente de Hazen-Williams para estos dos materiales es bastante similar.

Podemos dividirlo en 3 zonas:

- La primera zona que se ubicará entre una velocidad de 0,2 m/s a 1,5 m/s, podemos indicar que esta es la zona de mayor susceptibilidad a cualquier cambio de diámetro o velocidad en el coeficiente de Hazen-Williams, como se puede observar el tratar de asignar un valor único a este coeficiente para esta zona es muy difícil debido a la gran variabilidad, podemos concluir que es la de mayor conflicto con la selección de un coeficiente de Hazen-Williams único, por lo que se recomienda hacer uso con cautela cuando las velocidades con las que trabajaremos se encuentren en esta zona.
- La segunda zona será considerada desde 1,5 m/s a 3 m/s podemos observar que a partir de esta velocidad para diámetros desde 1” hasta 12” el coeficiente de Hazen-Williams se comporta de manera más agrupada por lo que podríamos asignar un valor único para esta zona y aceptando de alguna manera el uso de la ecuación de Hazen-Williams con un valor en su coeficiente de “150” para tuberías de PVC y PEAD.

- La tercera zona es considerada desde una velocidad de 3 m/s en adelante, al conocer las limitaciones del uso de la ecuación de Hazen-Williams se ha considerado una tercer zona a partir de 3 m/s de velocidad del agua en la tubería, podemos observar que el coeficiente se comporta de manera agrupada pero debido a las grandes pérdidas originadas a altas velocidades es imposible asignar un valor de coeficiente debido a que la mínima variación en este coeficiente repercute de gran manera en el cálculo de pérdidas por fricción, es ya sabido que no se debe de usar la ecuación de Hazen-Williams en velocidades con esta magnitud debido a la falta de precisión que existe en su capacidad de cuantificar las pérdidas por fricción.

En las tablas 27 y 28 debido a la variación porcentual y a las limitaciones de la ecuación de Hazen-Williams se pinta de naranja aquellos rangos en los que se aconseja no debemos de trabajar con esta ecuación.

*Tabla 27: Porcentaje de sub estimación y sobre estimación de pérdidas por fricción para tubería PVC*

Diámetro	Velocidad (m/s)					
	0,2	1	2	3	4	5
1"	-15	2,9	7,7	10,5	11,8	12,9
2"	-7,9	7,9	11,9	14,2	15,3	16,1
3"	-4,3	10,3	13,9	15,9	16,8	17,5
4"	-1,8	11,9	15,2	17	17,7	18,3
6"	1,3	13,7	16,6	18,1	18,7	19,2
8"	3,3	13,9	17,4	18,7	19,3	19,6
10"	4,8	14,9	17,9	19,1	19,6	19,9
12"	5,9	15,4	18,3	19,3	19,8	20

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28: Porcentaje de sub estimación y sobre estimación de pérdidas por fricción para tubería PEAD

Diámetro	Velocidad (m/s)					
	0,2	1	2	3	4	5
1"	-14,9	3,3	8,3	11,4	13	14,3
2"	-7,8	8,2	12,5	15	16,3	17,3
3"	-4,2	10,6	14,4	16,7	17,8	18,7
4"	-1,8	12,2	15,7	17,7	18,6	19,3
6"	1,4	14	17	18,8	19,5	20,2
8"	3,4	14,1	17,9	19,4	20,1	20,6
10"	4,9	15	18,4	19,8	20,4	20,8
12"	6	16	18,8	20	20,6	20,9

Fuente: Elaboración propia

Para tuberías de FF y FFD si observamos las figuras 69 y 70 podemos advertir que el comportamiento del coeficiente de Hazen-Williams para estos dos materiales es bastante similar pero también es disperso, carece de algún sector en específico donde se agrupen o se mantengan constante el coeficiente de Hazen-Williams, debido a esto lo podemos dividir en 2 zonas:

- La primera zona que se ubicara entre una velocidad de 0,2 m/s a 2 m/s, podemos indicar que en esta zona el coeficiente de Hazen-Williams podría tomar un valor medio de 130 y 120 respectivamente.
- La segunda zona será considerada desde 2 m/s o más podemos observar que a partir de esta velocidad para diámetros desde 1" hasta 12 " el coeficiente de Hazen-Williams continua sin comportarse de manera más agrupada por lo que no podríamos asignar un valor único para esta zona y tomando en cuenta que a mayor velocidad las pérdidas por fricción son mayores, por lo que no podemos recomendar su uso adoptando un coeficiente de Hazen-Williams constante y debido a la gran variabilidad se deberá de corregir el mismo si se desea hacer uso de esta ecuación sin pasar por alto que el limitante

de esta ecuación es de 3 m/s debido que a mayores velocidades las pérdidas por fricción calculadas cuentan con una sobre estimación en demasía.

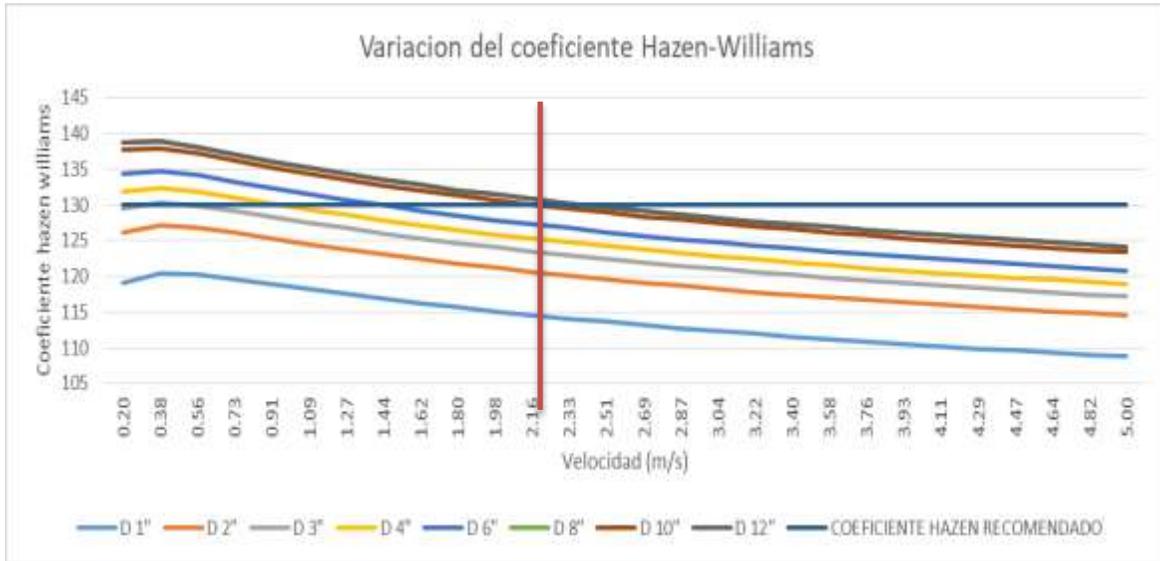


Figura 69:: Variación del coeficiente Hazen – Williams para tubería “FF”  
Fuente: Elaboración propia

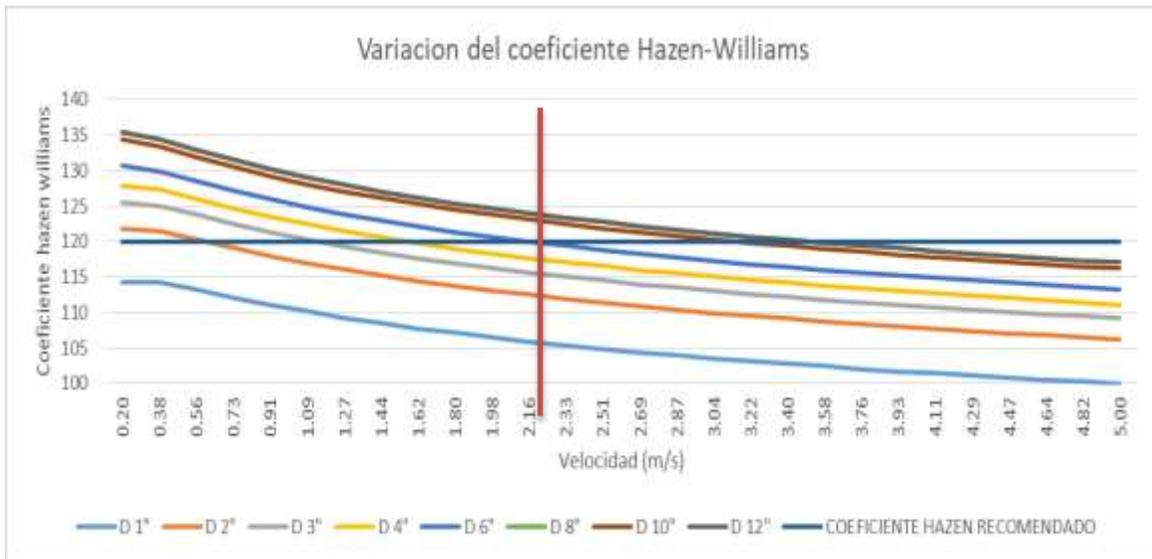


Figura 70: Variación del coeficiente Hazen – Williams para tubería “FFD”  
Fuente: Elaboración propia

En las tablas 29 y 30 debido a la variación porcentual y a las limitaciones de la ecuación de Hazen-Williams se pinta de naranja aquellos rangos en los que se aconseja no debemos de trabajar con esta ecuación.

Tabla 29: Porcentaje de sub estimación y sobre estimación de pérdidas por fricción para tubería FF

Diámetro	Velocidad (m/s)					
	0,2	1	2	3	4	5
1"	-15	-15,5	-20,1	-23,7	-26	-28,1
2"	-5,9	-7,5	-12,6	-16,5	-19,2	-21,3
3"	-1,1	-3,5	-8,7	-12,8	-15,6	-17,9
4"	2,1	-0,5	-6,2	-10,4	-13,3	-15,6
6"	6,2	2,8	-3,4	-7,1	-10,4	-12,7
8"	9	5	-0,9	-5,2	-8,5	-10,8
10"	10,9	6,7	0,6	-4	-7	-9,5
12"	12,4	7,9	1,7	-2,6	-6	-8,5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30: Porcentaje de sub estimación y sobre estimación de pérdidas por fricción para tubería FFD

Diámetro	Velocidad (m/s)					
	0,2	1	2	3	4	5
1"	-8,6	-13,9	-19,8	-23,9	-26,6	-28,6
2"	2,4	-4,3	-11	-15,1	-18,3	-20,6
3"	8,2	-0,8	-6,3	-10,5	-14,1	-16,5
4"	12,1	4	-3,2	-7,6	-11,1	-13,7
6"	17,2	8,5	-0,7	-4	-7,5	-10,1
8"	20,5	11,5	3,3	-1,1	-5,1	-7,8
10"	22,9	13,1	5,2	0,4	-3,4	-6,1
12"	24,8	15	6,5	1,9	-2,1	-4,8

Fuente: Elaboración propia

Analizaremos el comportamiento del coeficiente de Hazen-Williams para FG.

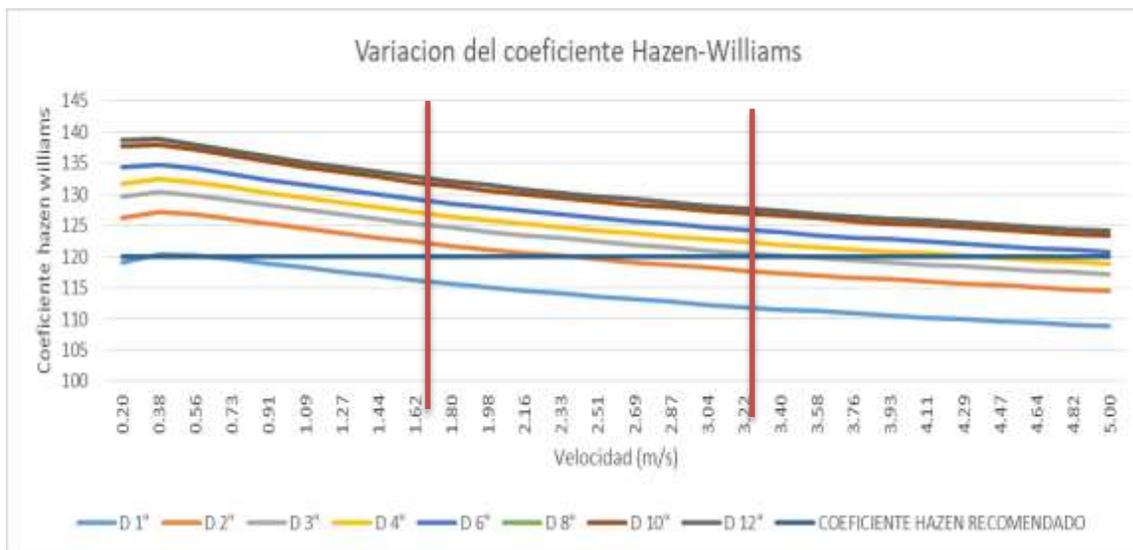


Figura 71: Variación del coeficiente Hazen – Williams (c) para tubería “FG”  
Fuente: Elaboración propia

Si observamos la figura 71 podemos advertir que el comportamiento del coeficiente de Hazen-Williams para este material podemos dividirlo en 3 zonas:

- La primera zona que se ubicará entre una velocidad de 0,2 m/s a 1,5 m/s, podemos indicar que esta es la zona de mayor susceptibilidad a cualquier cambio de diámetro o velocidad en el coeficiente de Hazen-Williams, como se puede observar el tratar de asignar un valor único a este coeficiente para esta zona es muy difícil debido a la gran variabilidad, podemos concluir que es la de mayor conflicto con la selección de un coeficiente de Hazen-Williams único, por lo que se recomienda hacer uso con cautela cuando las velocidades con las que trabajaremos se encuentren en esta zona.
- La segunda zona será considerada desde 1,5 m/s a 3 m/s podemos observar que a partir de esta velocidad para diámetros desde 1” hasta 12” el coeficiente de Hazen-Williams se comporta de manera más agrupada por lo que podríamos asignar un valor único para esta zona y aceptando de alguna manera el uso de la ecuación de Hazen-Williams.
- La tercera zona es considerada desde una velocidad de 3 m/s en adelante, al conocer las limitaciones del uso de la ecuación de Hazen-Williams se ha considerado una tercer zona

a partir de 3 m/s de velocidad del agua en la tubería, podemos observar que el coeficiente se comporta de manera agrupada pero debido a las grandes pérdidas originadas a altas velocidades es imposible asignar un valor de coeficiente debido a que la mínima variación en este coeficiente repercute de gran manera en el cálculo de pérdidas por fricción, es ya sabido que no se debe de usar la ecuación de Hazen-Williams en velocidades con esta magnitud debido a la falta de precisión que existe en su capacidad de cuantificar las pérdidas por fricción.

En las tablas 31 debido a la variación porcentual y a las limitaciones de la ecuación de Hazen-Williams se pinta de naranja aquellos rangos en los que se aconseja no debemos de trabajar con esta ecuación.

*Tabla 31: Porcentaje de sub estimación y sobre estimación de pérdidas por fricción para tubería FG*

Diámetro	Velocidad (m/s)					
	0,2	1	2	3	4	5
1"	-1,4	-2	-7,6	-11,3	-14,3	-16,6
2"	9,1	7,2	1,4	-3	-6,3	-8,8
3"	14,7	12	5,7	1,5	-2,2	-4,7
4"	18,4	15,3	8,6	4,1	0,6	-2,1
6"	23,2	19,1	12,3	7,8	4	1,3
8"	26,4	21,9	14,9	10	6,2	3,4
10"	28,6	23	16,4	11,6	7,8	4,9
12"	30,4	25	17,8	13	9	6,1

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.3 Efecto en el cálculo de diámetros y capacidad de conducir caudales

Este ejemplo fue extraído del libro “hidráulica de tuberías pag. 142 del autor Juan G. Saldarriaga V.”

Se desea diseñar una tubería para transportar 45 l/s de agua a una temperatura de 15°C ( $\nu = 1.15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ) a lo largo de una distancia de 3000m, desde una toma hasta una estación de bombeo con fines de riego. La diferencia de cabeza entre la toma y el nivel del agua en el

pozo de succión de las bombas es de 100 m, estando la toma por encima de dicho nivel. Se desea que el flujo sea movido únicamente por la acción de la gravedad. Hacer el diseño utilizando las metodologías de Darcy-Weisbach con  $k = 0,0000025$  m y de Hazen-Williams con  $C_{hw} = 140$  (PVC). A partir del diagrama de flujo para la metodología de Darcy-Weisbach y Hazen-Williams.

En un principio debemos de depurar aquellos diámetros que no cumplan restricciones de velocidad para tuberías, de esta depuración obtenemos la tabla 32.

Tabla 32: Perdidas de carga sin diámetros depurados

LONG	CAUDAL DISEÑO	DIAM	DIAM	VELOCIDAD	Re	f	f'	Darcy Weisbach	Hazen Williams	% DE ERROR
								PERDIDA DE CARGA	PERDIDA DE CARGA	
(m)	(l/s)	(PULG)	(m)	(m/s)				(m)	(m)	
3000	45.00000	6	0.152	2.47	326919	0.01	0.01	87.98	103.32	17.4
3000	45.00000	8	0.203	1.39	245189	0.02	0.02	21.95	25.45	15.9
3000	45.00000	10	0.254	0.89	196151	0.02	0.02	7.49	8.59	14.6
3000	45.00000	12	0.305	0.62	163459	0.02	0.02	3.12	3.53	13.4

Fuente: Elaboración propia

Los diámetros que cumplen con parámetros de buen diseño para la velocidad son 6", 8", 10" y 12", al analizar las pérdidas por fricción generadas indicamos:

- A través de la metodología de Darcy-Weisbach observamos que el diámetro 6" cumple con los parámetros del problema generando una pérdida de carga por fricción de 87,98 m.c.a. lo cual es menor a la diferencia de alturas garantizando el abastecimiento al pozo de succión por lo que a través de esta metodología seleccionamos un diámetro de 6".
- A través de la metodología de Hazen-Williams al analizar el diámetro 6" verificamos que la pérdida de carga por fricción es de 103,32 m.c.a. por encima de la diferencia de alturas entre pozos lo que nos obliga a pasar al siguiente diámetro, para 8" podemos verificar que la pérdida de carga es de 25,45 m.c.a. lo cual cumpliría con nuestra pérdida permitida por lo que seleccionamos el diámetro 8" para la metodología de Hazen-Williams.

Este ejercicio nos ayuda a poder observar las diferencias que pueden generar el uso de estas 2 ecuaciones pero también analizaremos con una misma pérdida cuales son las capacidades de conducciones de agua, es decir cuál es el caudal que puede conducir una tubería de 3000m de longitud con una pérdida de carga por fricción de 100 m.c.a. lo cual se muestra en las siguientes tablas.

Tabla 33: Caudales para tubería “PVC;  $e=0,0000025$ ;  $C=140$ ”

	Diámetro (pulg)							
Caudal (l/s)	1"	2"	3"	4"	6"	8"	10"	12"
H-W	0,40	2,46	7,14	15,22	44,22	94,21	169,41	273,62
D-W	0,40	2,58	7,63	16,43	48,28	103,41	186,52	301,70

Fuente: Elaboración propia

Tabla 34: Caudales para tubería “PEAD;  $e=0,0000015$ ;  $C=140$ ”

	Diámetro (pulg)							
Caudal (l/s)	1"	2"	3"	4"	6"	8"	10"	12"
H-W	0.40	2.46	7.14	15.22	44.22	94.21	169.41	273.62
D-W	0.40	2.58	7.65	16.48	48.41	103.73	187.13	302.73

Fuente: Elaboración propia

Tabla 35: Caudales para tubería “FF;  $e=0,00015$ ;  $C=130$ ”

	Diámetro (pulg)							
Caudal (l/s)	1"	2"	3"	4"	6"	8"	10"	12"
H-W	0.37	2.28	6.63	14.14	41.06	87.48	157.31	254.08
D-W	0.34	2.18	6.42	13.77	40.16	85.65	153.93	248.33

Fuente: Elaboración propia

Tabla 36: Caudales para tubería “FFD;  $e=0,00025$ ;  $C=120$ ”

	Diámetro (pulg)							
Caudal (l/s)	1"	2"	3"	4"	6"	8"	10"	12"
H-W	0.34	2.11	6.12	13.05	37.90	80.75	145.21	234.53
D-W	0.32	2.06	6.06	13.00	37.99	81.10	145.89	235.54

Fuente: Elaboración propia

Tabla 37: Caudales para tubería “FG; e=0,00015; C=120”

	Diámetro (pulg)							
Caudal (l/s)	1"	2"	3"	4"	6"	8"	10"	12"
H-W	0.34	2.11	6.12	13.05	37.90	80.75	145.21	234.53
D-W	0.34	2.18	6.42	13.77	40.16	85.65	153.93	248.33

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en las anteriores tablas los caudales varían dependiendo de la velocidad y rugosidad de la tubería.

### 4.3 Corrección del Coeficiente de Hazen-Williams

Se procedió a desarrollar la interfaz de este programa a fin de que el usuario pueda visualizar los resultados obtenidos en cuanto a la corrección de los coeficientes de Hazen-Williams. El procedimiento que debe seguir el usuario del programa para obtener dichos resultados se ilustra a continuación:

- Se debe introducir el valor de la rugosidad absoluta del material con el que se desea trabajar (no hay límites de aplicación).
- Se debe seleccionar la viscosidad del líquido con el que se desea trabajar (no hay límites de aplicación).
- Introducir el coeficiente de Hazen-Williams aconsejado en la literatura.
- Seleccionar los diámetros con los que se desea trabajar (solo diámetros de 1” a 12”).
- Seleccionar las velocidades con las que se desea trabajar (solo no poner 0).

Una vez introducido estos datos en el programa, el mismo nos arrojará un coeficiente de Hazen-Williams corregido válido para los parámetros que hemos introducido, cabe mencionar que a mayor sea el rango de velocidades y diámetro menor será la exactitud del coeficiente corregido.

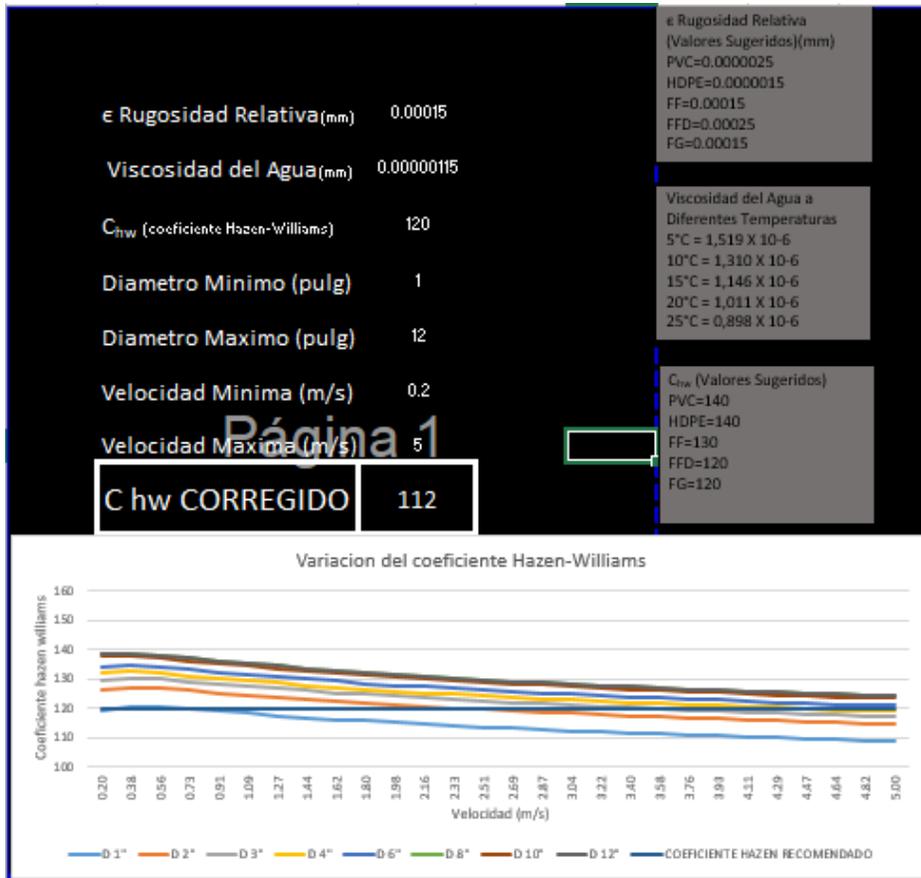


Figura 72: Interfaz del programa para la corrección de coeficiente de Hazen-Williams  
 Fuente: Elaboración propia

Mediante el uso de este programa se proponen coeficientes corregidos de Hazen-Williams para rangos específicos, no obstante se recomienda el uso del programa para cada caso en particular debido a que no podemos generalizar a tan solo los rangos que se tomaron en cuenta.

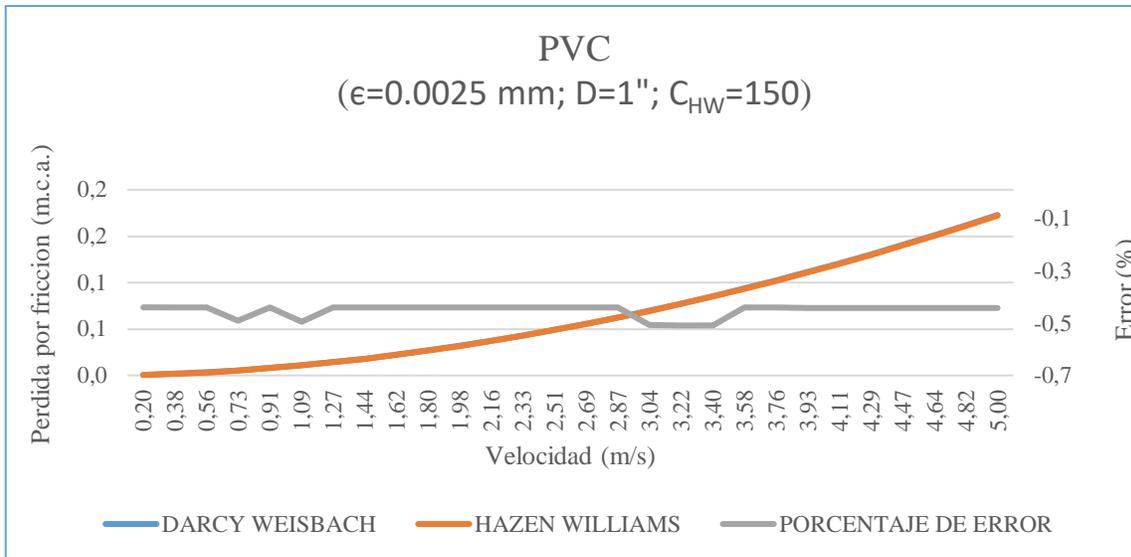


Figura 73: Pérdidas por fricción haciendo uso del coeficiente de Hazen-Williams corregido  
Fuente: Elaboración propia

La ecuación utilizada para la corrección del coeficiente de Hazen-Williams sería:

$$h_f = 10.67 * \left( \frac{Q}{\left( \frac{129 D^{0,129}}{f Q^{0,148}} \right)^{0,54}} \right)^{1,852} * \frac{L}{D^{4,87}}$$

Donde:

$h_f$ = Pérdida de carga por fricción (m.c.a.)

L= Longitud del tubo (m)

D= Diámetro interior del tubo (m)

Q= Caudal en el interior del tubo (m<sup>3</sup>/s)

f: factor de fricción de la ecuación de Darcy-Weisbach (adimensional)

#### 4.3.1 Corrección de coeficientes para tuberías antiguas

En la planilla de Excel diseñada podemos realizar correcciones del coeficiente de Hazen-Williams para diferentes rugosidades absolutas lo que nos permite poder realizar el cálculo

de un nuevo coeficiente de Hazen-Williams para tuberías con un periodo de uso en base a su rugosidad absoluta.

En este caso analizaremos 3 casos específicos de tuberías y observaremos el comportamiento del coeficiente de Hazen-Williams con datos de una rugosidad absoluta correspondiente a 20 años.

- Tubería PVC  $e=0,0004\text{mm}$

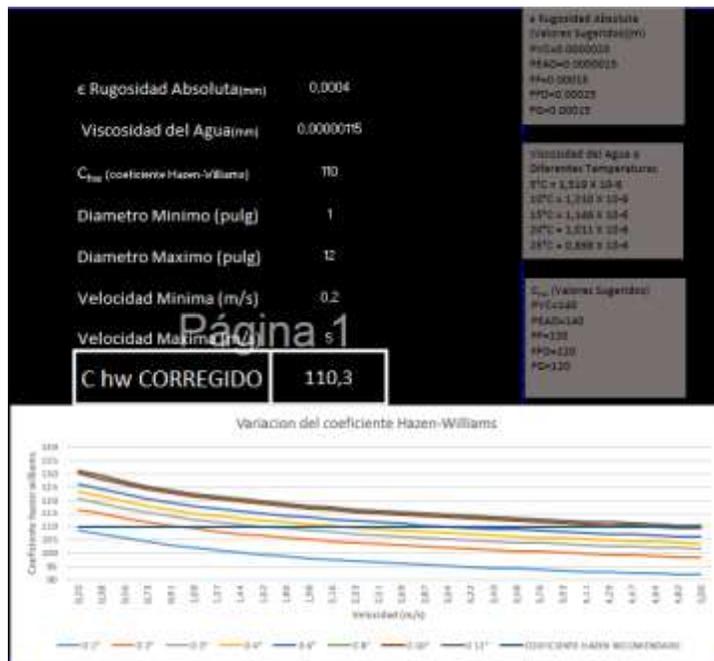


Figura 74: Variación del coeficiente de H-W para tubería PVC 30 años de uso  
Fuente: Elaboración propia

Podemos observar que para una tubería PVC con estas características se recomendaría un coeficiente de Hazen-Williams de 110.

- Tubería FG  $e=0,001$  mm

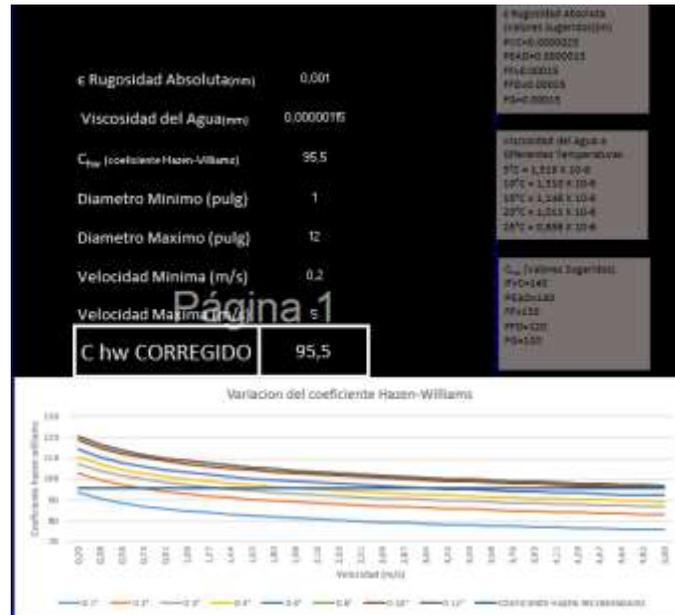


Figura 75: Variación del coeficiente de H-W para tubería FG 30 años de uso  
Fuente: Elaboración propia

Podemos observar que para tubería FG con estas características se recomendaría un coeficiente de Hazen-Williams de 95.

- Tubería FFD  $e=0.0008$

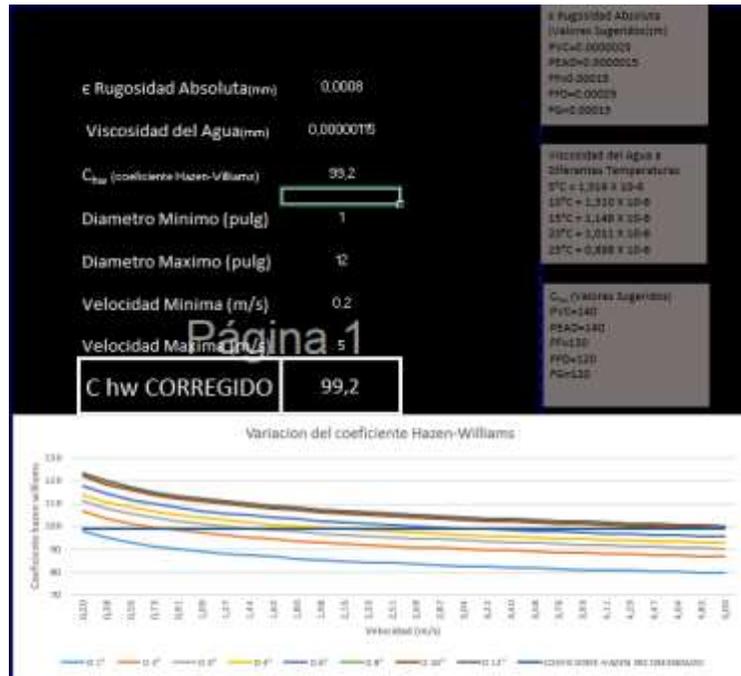


Figura 76: Variación del coeficiente de H-W para tubería FG 20 años de uso  
 Fuente: Elaboración propia

Podemos observar que para tubería FG con estas características se recomendaría un coeficiente de Hazen-Williams de 99.

Se puede observar que con el pasar del tiempo y con el uso las tuberías van perdiendo sus características en relación de cuando estas son nuevas, estas características que sobre todo tienen que ver con la determinación de la rugosidad absoluta en las tuberías, la cual incide en gran manera en la cuantificación de pérdidas por fricción, por lo tanto se prevé una variación en presiones y caudales suministrados, por lo que es bastante importante el poder realizar un cálculo sobre la determinación del coeficiente de Hazen-Williams para tuberías usadas el cual a partir de la planilla generada podemos hacerlo.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- Con base en los resultados obtenidos en relación con el efecto del uso de la ecuación de Hazen-Williams en tuberías de conducción, se puede concluir, en principio, que los coeficientes de Hazen-Williams sugeridos en la literatura, no son correctos dado que estos valores tienden a sobrestimar y subestimar las pérdidas por fricción ya que no tienen en cuenta la variabilidad que presenta dicho coeficiente en el comportamiento hidráulico.
- En este trabajo se verificó que las diferencias generadas con la ecuación de Hazen-Williams para velocidades mayores a 3m/s en tuberías de PVC, PEAD y FG son bastante significantes por lo que no se puede trabajar en este rango de velocidad y para tuberías de FF y FFD no se debe trabajar a velocidades mayores a 2 m/s.
- En la práctica, cuando se calculan sistemas de conducción de agua (redes de distribución, conductoras, etc.) es posible usar las ecuaciones empíricas para calcular las pérdidas de carga en las tuberías, principalmente por su sencillez matemática. no obstante es necesario analizar en qué sector del comportamiento del coeficiente de Hazen-Williams nos encontramos así de esta manera aminorar errores en el cálculo o utilizar un método que permita obtener el valor correlacionado de los coeficientes de rugosidad de las ecuaciones empíricas y las de Darcy-Weisbach.
- En tuberías de PVC el coeficiente de fricción para conducciones de agua a 15°C se comporta de la siguiente manera.

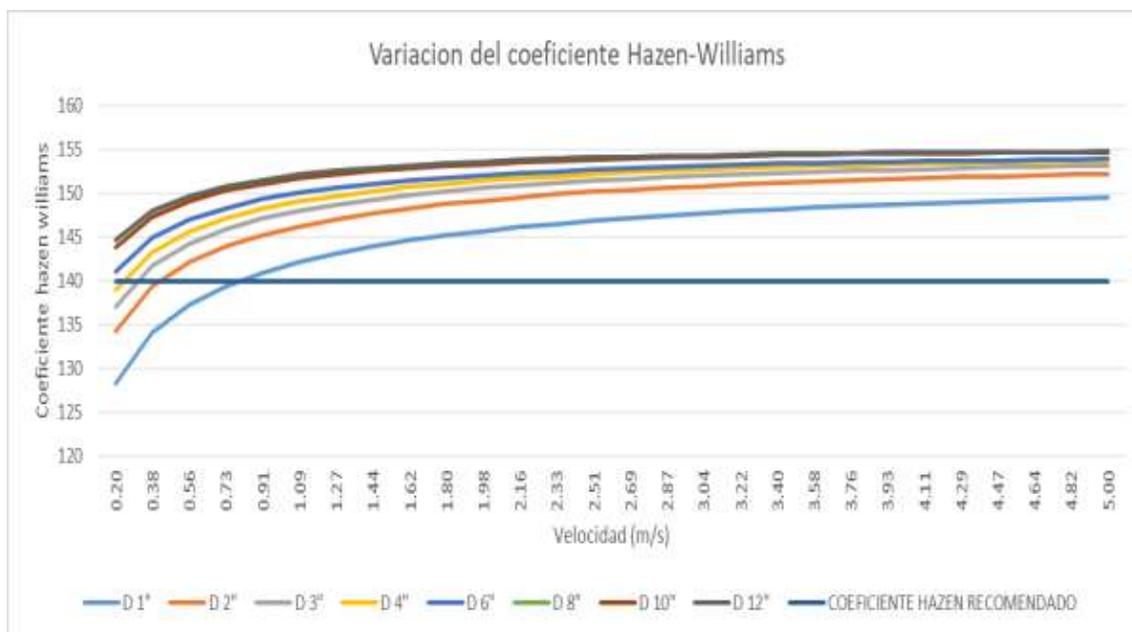


Figura 77: Variación del coeficiente Hazen – Williams para tubería “PVC”  
Fuente: Elaboración propia

Esta diferencia entre el coeficiente de fricción y el coeficiente de Hazen - Williams genera diferencias de magnitud entre estas 2 ecuaciones desde -15% hasta 20%.

Tabla 38: Porcentaje de sub estimación y sobre estimación para tubería PVC

Diámetro	Velocidad (m/s)					
	0,2	1	2	3	4	5
1”	-15	2,9	7,7	10,5	11,8	12,9
2”	-7,9	7,9	11,9	14,2	15,3	16,1
3”	-4,3	10,3	13,9	15,9	16,8	17,5
4”	-1,8	11,9	15,2	17	17,7	18,3
6”	1,3	13,7	16,6	18,1	18,7	19,2
8”	3,3	13,9	17,4	18,7	19,3	19,6
10”	4,8	14,9	17,9	19,1	19,6	19,9
12”	5,9	15,4	18,3	19,3	19,8	20

Fuente: Elaboración propia

Y no se recomienda que se trabaje en los rangos que fueron pintados de color naranja.

- En tuberías de PEAD el coeficiente de fricción para conducciones de agua a 15°C se comporta de la siguiente manera.

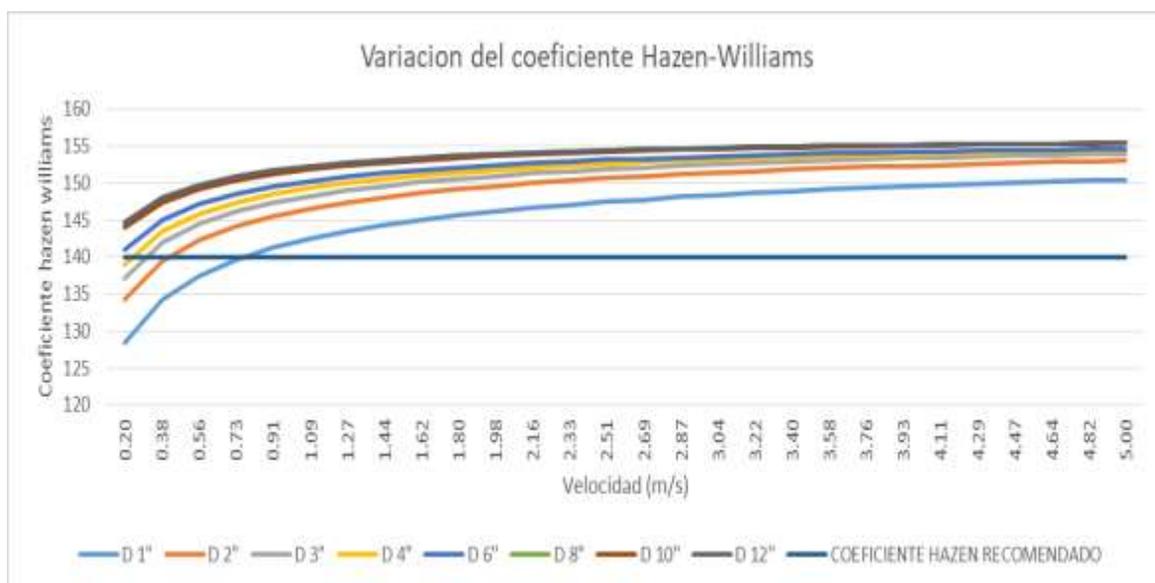


Figura 78: Variación del coeficiente Hazen – Williams para tubería “PEAD”  
Fuente: Elaboración propia

Esta diferencia entre el coeficiente de fricción y el coeficiente de Hazen - Williams genera diferencias de magnitud entre estas 2 ecuaciones desde -14,9% hasta 20,9%.

Tabla 39: Porcentaje de sub estimación y sobre estimación para tubería PEAD

Diámetro	Velocidad (m/s)					
	0,2	1	2	3	4	5
1"	-14,9	3,3	8,3	11,4	13	14,3
2"	-7,8	8,2	12,5	15	16,3	17,3
3"	-4,2	10,6	14,4	16,7	17,8	18,7
4"	-1,8	12,2	15,7	17,7	18,6	19,3
6"	1,4	14	17	18,8	19,5	20,2
8"	3,4	14,1	17,9	19,4	20,1	20,6
10"	4,9	15	18,4	19,8	20,4	20,8
12"	6	16	18,8	20	20,6	20,9

Fuente: Elaboración propia

Y no se recomienda que se trabaje en los rangos que fueron pintados de color naranja.

- En tuberías de FF el coeficiente de fricción para conducciones de agua a 15°C se comporta diferente en relación a los 2 materiales anteriores, ahora su comportamiento es de manera descendente.

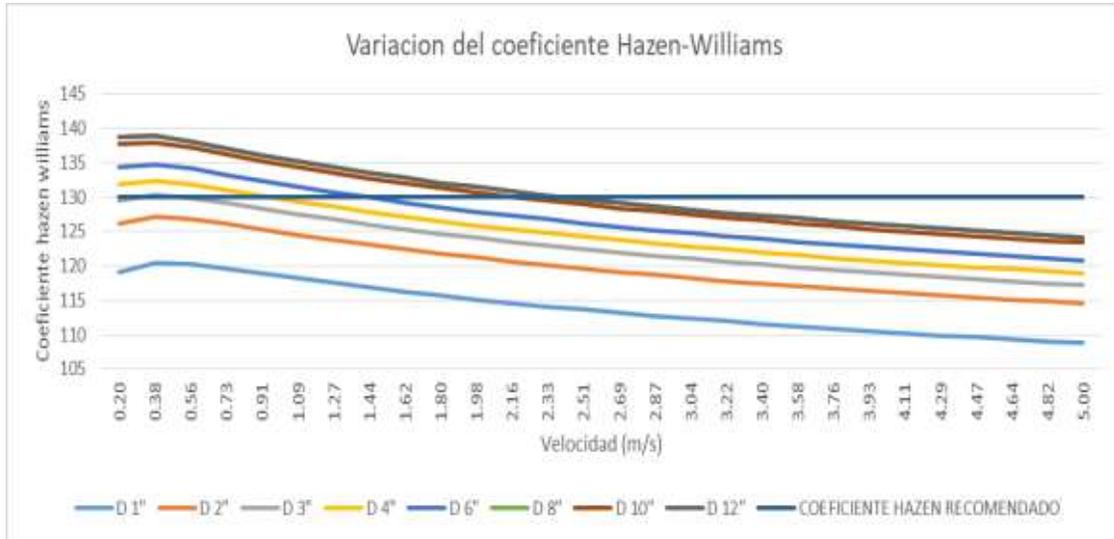


Figura 79: Variación del coeficiente Hazen – Williams para tubería “FF”  
Fuente: Elaboración propia

Esta diferencia entre el coeficiente de fricción y el coeficiente de Hazen - Williams genera diferencias de magnitud entre estas 2 ecuaciones desde -28,1% hasta 12,4%.

Tabla 40: Porcentaje de sub estimación y sobre estimación para tubería FF

Diámetro	Velocidad (m/s)					
	0,2	1	2	3	4	5
1”	-15	-15,5	-20,1	-23,7	-26	-28,1
2”	-5,9	-7,5	-12,6	-16,5	-19,2	-21,3
3”	-1,1	-3,5	-8,7	-12,8	-15,6	-17,9
4”	2,1	-0,5	-6,2	-10,4	-13,3	-15,6
6”	6,2	2,8	-3,4	-7,1	-10,4	-12,7
8”	9	5	-0,9	-5,2	-8,5	-10,8
10”	10,9	6,7	0,6	-4	-7	-9,5
12”	12,4	7,9	1,7	-2,6	-6	-8,5

Fuente: Elaboración propia

Y no se recomienda que se trabaje en los rangos que fueron pintados de color naranja.

- En tuberías de FFD el coeficiente de fricción para conducciones de agua a 15°C se comporta de la siguiente manera.

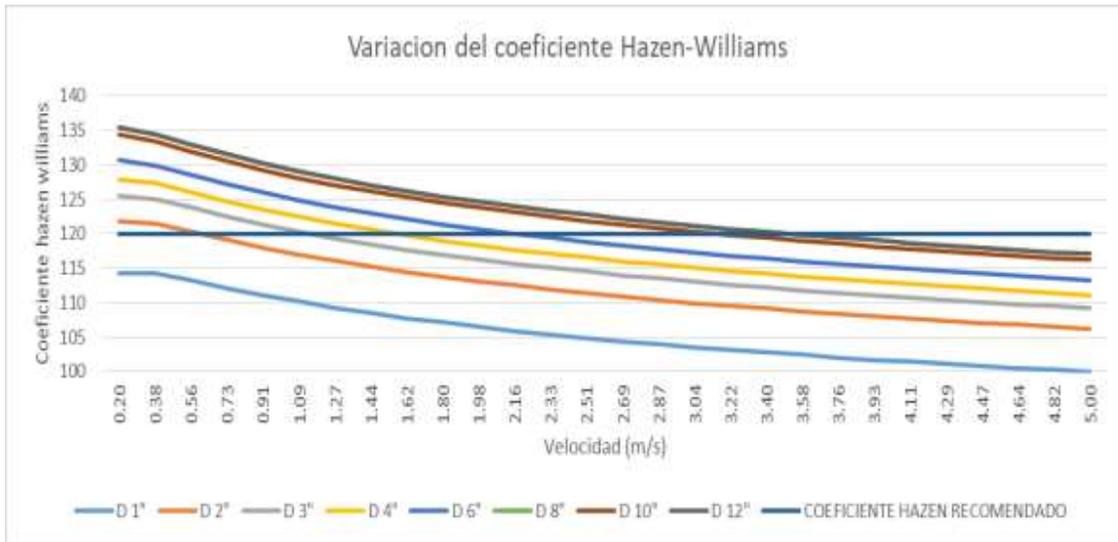


Figura 80: Variación del coeficiente Hazen – Williams para tubería “FFD”

Fuente: Elaboración propia

Esta diferencia entre el coeficiente de fricción y el coeficiente de Hazen - Williams genera diferencias de magnitud entre estas 2 ecuaciones desde -28,6% hasta 24,8%.

Tabla 41: Porcentaje de sub estimación y sobre estimación para tubería FFD

Diámetro	Velocidad (m/s)					
	0,2	1	2	3	4	5
1”	-8,6	-13,9	-19,8	-23,9	-26,6	-28,6
2”	2,4	-4,3	-11	-15,1	-18,3	-20,6
3”	8,2	-0,8	-6,3	-10,5	-14,1	-16,5
4”	12,1	4	-3,2	-7,6	-11,1	-13,7
6”	17,2	8,5	-0,7	-4	-7,5	-10,1
8”	20,5	11,5	3,3	-1,1	-5,1	-7,8
10”	22,9	13,1	5,2	0,4	-3,4	-6,1
12”	24,8	15	6,5	1,9	-2,1	-4,8

Fuente: Elaboración propia

Y no se recomienda que se trabaje en los rangos que fueron pintados de color naranja.

- En tuberías de FG el coeficiente de fricción para conducciones de agua a 15°C se comporta de la siguiente manera.

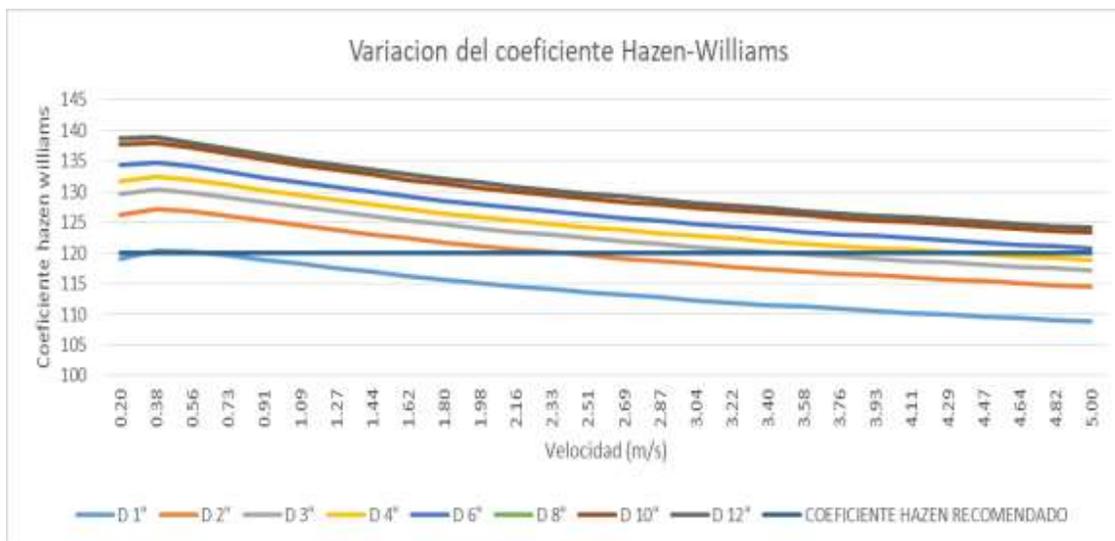


Figura 81: Variación del coeficiente Hazen – Williams para tubería “FG”  
Fuente: Elaboración propia

Esta diferencia entre el coeficiente de fricción y el coeficiente de Hazen - Williams genera diferencias de magnitud entre estas 2 ecuaciones desde -16,6% hasta 30,4%.

Tabla 42: Porcentaje de sub estimación y sobre estimación para tubería FG

Diámetro	Velocidad (m/s)					
	0,2	1	2	3	4	5
1”	-1,4	-2	-7,6	-11,3	-14,3	-16,6
2”	9,1	7,2	1,4	-3	-6,3	-8,8
3”	14,7	12	5,7	1,5	-2,2	-4,7
4”	18,4	15,3	8,6	4,1	0,6	-2,1
6”	23,2	19,1	12,3	7,8	4	1,3
8”	26,4	21,9	14,9	10	6,2	3,4
10”	28,6	23	16,4	11,6	7,8	4,9
12”	30,4	25	17,8	13	9	6,1

Fuente: Elaboración propia

Y no se recomienda que se trabaje en los rangos que fueron pintados de color naranja.

- Al observar estos resultados concluimos que la ecuación de Hazen – Williams no evalúa apropiadamente el efecto de cada uno de los factores que inciden en la pérdida de energía de una tubería, es cierto que en determinados rangos estas diferencias son mínimas por lo que siguiendo esos lineamientos los resultados de cierta forma pueden ser aceptados.
- La simplicidad en el uso de la ecuación de Hazen - Williams es innegable.
- La ecuación de Darcy - Weisbach es una de las pocas expresiones que agrupan estos factores y por la tanto la ventaja de esta es que puede aplicarse a todos los tipos de flujo hidráulico (laminar, transicional y turbulento).
- La ecuación de Hazen - Williams solo debe ser usada si es necesario o en proyectos que no contemplen una extensión mayor a 1000 m en los cuales debido al tamaño del proyecto las diferencias que se podrían generar serían mínimas.
- Realizando la corrección del coeficiente de Hazen – Williams mediante la ecuación de Liou los errores son menores al 1% en todos los materiales analizados es por eso que se recomienda que si se desea utilizar la ecuación de Hazen-Williams solo sea con esta fórmula.

$$h_f = 10.67 * \left( \frac{Q}{\left( \frac{129 D^{0,129}}{f Q^{0,148}} \right)^{0,54}} \right)^{1,852} * \frac{L}{D^{4,87}}$$

Donde:

$h_f$ = Pérdida de carga por fricción (m.c.a.)

L= Longitud del tubo (m)

D= Diámetro interior del tubo (m)

Q= Caudal en el interior del tubo (m<sup>3</sup>/s)

f: factor de fricción de la ecuación de Darcy-Weisbach (adimensional)

- La planilla generada es una excelente herramienta para correcciones del coeficiente de Hazen-Williams y para cálculos de coeficientes de Hazen-Williams para tuberías

que han cambiado su rugosidad absoluta ya sea por envejecimiento o deterioro de la misma.

### **Recomendaciones**

- Se recomienda inculcar el uso de la ecuación de Darcy - Weisbach debido a todas las diferencias expuestas en este trabajo.
- Se recomienda realizar una determinación de coeficientes de Hazen-Williams a través de la planilla Excel generada con datos de rugosidad absolutas de tuberías antiguas en nuestro medio.