



Pontificia Universidad
Católica del Ecuador

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

SEDE MANABÍ – CAMPUS PORTOVIEJO

CARRERA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

TRABAJO DE TITULACIÓN:

**“VALIDACIÓN DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE HAZEN – WILLIAMS
PARA TUBERÍAS DE AGUA POTABLE DE DIFERENTES DIÁMETROS,
MEDIANTE MODELACIÓN HIDRÁULICA”.**

PREVIO AL TÍTULO DE:

INGENIERO HIDRÁULICO

AUTOR:

BRYAN XAVIER MENDOZA ÁLVAREZ

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN:

ING. FABIÁN RODRIGO ESPINALES. MSC.

MARZO, 2021

PORTOVIEJO,

CERTIFICACIÓN DE LA TESIS

Ing. Fabián Rodrigo Espinales, M.Sc.

Director del Proyecto de Grado.

CERTIFICA:

En mi calidad de tutor del trabajo de integración curricular, certifico haber revisado el presente manuscrito de investigación, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Manabí, cumpliendo la Normativa del Trabajo de Integración Curricular; en consecuencia, es apto para su presentación y sustentación

Ing. Fabián Rodrigo Espinales, M.Sc.
CI: 1306597657

ACTA DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL

El jurado examinador aprueba el presente trabajo de integración curricular en nombre de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Manabí.

Ing. Fabián Espinales M. Sc
Primer lector

Ing. Jesús Chavarría M. Sc
Tercer lector

Ing. Jhon Félix Mera M. Sc
Segundo lector

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

En manuscrito no contiene ningún tipo de material que ha sido aceptado para la obtención de un título universitario en otra institución, excepto en forma de información de sustento que ha sido debidamente citada en mi trabajo. Este trabajo es de total responsabilidad del autor, quien declara bajo juramento que ninguna sección de esta tesis infringe los derechos de autor de nadie.

Fecha: _____

Bryan Xavier Mendoza Álvarez
Dirección: Portoviejo, ciudadela, Andrés B. entre acacias y tulipanes
E-mail: bryan.211mend@gmail.com
Celular: 099 102 2302

Bryan Xavier Mendoza Álvarez
C.I.: 1311639544

DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador a distribuir este manuscrito de investigación en medios físicos y electrónicos con el fin de promover la divulgación de mis resultados a la comunidad científica y a la sociedad en general. Adicionalmente autorizo el uso de los contenidos de esta investigación como bibliografía para fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, citando como fuente de información al autor de este trabajo.

Bryan Xavier Mendoza Álvarez
C.I.: 1311639544

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mis padres

RESUMEN

Este estudio realizado planteo una investigación explicativa-experimental, la cual determinó la validación del coeficiente de rugosidad de Hazen – Williams para tuberías de agua potable de diferentes diámetros desde media pulgada a dos pulgadas y media, mediante un modelo hidráulico, que afirmarían los valores optados en los diseños hidráulicos ejecutados. Por ello, este estudio se ejecutó en Portoviejo en un laboratorio de sala, en el mes de enero del 2021; se utilizó la metodología de Hazen-Williams, en relación a un modelo hidráulico, con un reservorio de 1000 l, con tuberías de policloruro de vinilo (PVC), usadas especialmente en redes de agua potable; en las tuberías se incorporaron piezómetros, los cuales serán los encargados de determinar pérdidas de cargas, para posteriormente despejar el valor del coeficiente "C" en Hazen-Williams. Una vez obtenido los valores del prototipo, se utilizó el software WaterCAD para validar los valores arrojados por ambos métodos. Los resultados mostrados tienden a disminuir mientras más aumenta el diámetro desde 140 a 115 refiriéndonos al valor de "C" utilizando diámetros desde media a dos pulgadas y medias, demostrando que, partiendo desde un determinado caudal, entre más aumenta el diámetro el coeficiente tiende a disminuir. En la modelación se comprobó con un valor estándar de "C" que la pérdida de carga tiende a disminuir con diámetros mayores, probablemente afectados por el caudal de diseño seleccionado.

Palabras claves: Hazen-Williams, Coeficiente, Diámetro, Caudal.

ABSTRACT

This study carried out proposed an explanatory–experimental investigation, which determined the validation of the Hazen-Williams roughness coefficient for drinking water pipes of different diameters from half an inch to two and a half inches, by means of a hydraulic model, which would affirm the values chosen in the hydraulic designs executed. For this reason, this study was carried out in Portoviejo at my home in a room laboratory, in January 2021; The Hazen-Williams methodology was used, in relation to a hydraulic model, with a 1000 l reservoir, with polyvinyl chloride (PVC) pipes, used especially in drinking water networks; Piezometers were incorporated into the pipes, which will be in charge of determining load losses, to later determine the value of the “C” coefficient in Hazen-Williams. Once the prototype values were obtained, the WaterCAD software was used to validate the values obtained by both methods. The results shown tend to decrease the more the diameter increases from 140 to 115, referring to the value of “C” using diameters from half to two and a half inches, showing that, starting from a certain flow, the more the diameter increases the coefficient tends to diminish. In the modeling it was verified with a standard value of “C” that the pressure drop tends to decrease with larger diameters, probably affected by the selected design flow.

Keywords: Hazen-Williams, Coefficient, Diameter, Flow.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

<i>CERTIFICACIÓN DE LA TESIS</i>	<i>i</i>
<i>ACTA DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL</i>	<i>ii</i>
<i>DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD</i>	<i>iii</i>
<i>DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR</i>	<i>iv</i>
<i>AGRADECIMIENTOS</i>	<i>v</i>
<i>RESUMEN</i>	<i>vi</i>
<i>INTRODUCCION</i>	<i>13</i>
<i>OBJETIVOS</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
<i>DISEÑO METODOLOGICO</i>	<i>16</i>
<i>MATERIALES Y METODOS</i>	<i>16</i>
<i>Área de estudio</i>	<i>16</i>
<i>Equipos y Materiales</i>	<i>16</i>
<i>MÉTODOS</i>	<i>16</i>
<i>Variables considerables en la investigación</i>	<i>16</i>
<i>VARIABLES CONSIDERADAS EN LA INVESTIGACIÓN</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
<i>Revisar información bibliográfica sobre la influencia del coeficiente de rugosidad e Hazen-Williams en tuberías de diferentes diámetros.</i>	<i>17</i>
<i>Comprobación de los coeficientes C de Hazen-Williams, mediante valores del modelado hidráulico</i>	<i>19</i>

<i>Procedimiento para comprobar el factor C de Hazen-Williams mediante los valores del modelo hidráulico</i>	<i>19</i>
MANEJO DE MODELO HIDRAULICO	20
<i>Funcionamiento del modelado.....</i>	<i>20</i>
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	21
<i>Revisión de información bibliográfica sobre la influencia del coeficiente de rugosidad e Hazen-Williams en tuberías de diferentes diámetros.</i>	<i>21</i>
<i>Elaborar un modelo hidráulico para la comprobación de los coeficientes C de Hazen Williams.....</i>	<i>23</i>
<i>Analizar la variación existente entre los coeficientes C de Hazen Williams de rugosidad mediante la modelación hidráulica entre los diferentes tipos de fabricantes de tuberías.</i>	<i>25</i>
CONCLUSIONES	27
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	28
ANEXOS	31

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1</i>	18
<i>Ecuación de Flujo Volumétrico</i>	18
<i>Tabla 2</i>	18
<i>Ecuación de C, de Hazen-Williams</i>	18
<i>Tabla 3</i>	22
<i>Valores de C de Hazen-Williams, para diferentes materiales</i>	22
<i>Tabla 4</i>	22
<i>Coficiente Rugosidad SENAGUA</i>	22
<i>Tabla 5</i>	24
<i>Valores (Coficiente, Perdidas de cargas, Longitud, Caudal, Diámetro)</i>	24

ÍNDICE DE GRAFICOS

<i>Gráfico 1</i>	31
<i>Diseño del prototipo del modelo hidráulico empleado</i>	31
<i>Gráfico 2</i>	32
<i>Determinación del material para el valor de C en ecuación de Hazen-Williams</i>	32
<i>Gráfico 3</i>	32
<i>Resultados en diámetro de 1/2 pulgadas</i>	32
<i>Gráfico 4</i>	33
<i>Resultados en diámetro de 3/4 pulgadas</i>	33
<i>Gráfico 5</i>	33
<i>Resultados en diámetro de 1 pulgadas</i>	33
<i>Gráfico 6</i>	34
<i>Resultados en diámetro de 1 1/2 pulgadas</i>	34
<i>Gráfico 7</i>	34
<i>Resultados en diámetro de 2 pulgadas</i>	34
<i>Gráfico 8</i>	35
<i>Secciones de tuberías empleadas en el prototipo físico</i>	35
<i>Gráfico 9</i>	36
<i>Elementos del Prototipo diseñado</i>	36
<i>Gráfico 10</i>	37
<i>Conexiones empleadas para la instalación del prototipo y toma de datos</i>	37

<i>Gráfico 11</i>	38
<i>Piezómetro para la lectura de alturas y el cálculo de pérdidas de carga</i>	38
<i>Gráfico 12</i>	39
<i>Instalación del prototipo físico en el área de estudio</i>	39
<i>Gráfico 13</i>	40
<i>Instalación de piezómetros en el prototipo físico</i>	40

INTRODUCCION

Una de las fórmulas exponenciales más multitudinarias, más que todo en América, es la de Hazen-Williams, empleada desde 1902 en experimentos de los autores y por los trabajos de sus ascendientes. La ecuación de Hazen-Williams desde su aparición temprana en la primera década del siglo XX ha sido una herramienta de suma importancia en manos de los ingenieros dedicados al diseño de redes hidráulicas (Alegret & Martinez, 2019).

El coeficiente “C”, sobre el que recae este estudio, se encuentra implantado en la ecuación principal de pérdidas de carga de Hazen-Williams; dicha ecuación depende de valores correspondientes a las características de las tuberías presentes en el sistema, así como también del caudal del mismo. Existe una gran demanda de tuberías de diferentes diámetros y materiales en el ámbito comercial, de las que resaltan por su constante uso, fabricantes como Plastigama, Tigre, Plástico Rival y otros; mismas tuberías que son utilizadas para diversos usos, entre ellos la implementación de servicios de agua potable, usos agrícolas, y demás que tienen como finalidad de ofrecer una calidad de vida alta para la población (Cortez et al., 2016).

La ecuación de *Hazen-Williams* es mayormente utilizada en el proceso de diseño de tuberías debido a la baja dificultad que presenta en los parámetros externos empleados al momento de ponerlos a prueba definiendo a lo que se conoce como el Coeficiente *C* de *Hazen-Williams*; dicho coeficiente depende del material de la tubería que se esté por implementar (Gavilánez, 2019).

La estimación o decisión sobre el coeficiente “C” a emplear, recae sobre el tipo de material de la tubería, como ejemplo tenemos tuberías de hierro fundido, concreto, tuberías revestidas de cemento, plástico o PVC y otras, que, a su vez, en algunos casos, parten de la consideración del tiempo que tienen al momento de ser empleadas.

En el pasado, el propósito de ejecutar el cálculo, recaía en la modificación de la ecuación presentada por Chezy debido a la complejidad que reflejaba calcular el coeficiente *C* en ella, por lo cual, lo más factible era partir desde la ecuación original de *Hazen-William*, modificándola; es así, como en el año 1905 con la publicación de *Hydraulic Tables* se mostraron las primeras tablas con los coeficientes para diferentes tipos de materiales (Flechas, 2011).

Como se mencionó anteriormente, las características de las tuberías empleadas como la rugosidad y el diámetro equivalen a parámetros físicos, que tienden a la afectación notoria al cumplir la tubería con su periodo de vida útil, por lo cual es necesario su cambio (Santos et al., 2018). Dichos parámetros incrementan las incrustaciones y la corrosión ocasionadas por el material de la tubería y el fluido lo que hace variar el coeficiente de *Hazen-Williams* al valor proveniente de fábrica a las tuberías. Por esta razón, la rugosidad incide en las pérdidas de carga, siendo uno de los factores más importantes en el diseño de las obras hidráulicas de conducción. (Alegret & Martinez, 2019).

De este modo, el ajuste de la ecuación de *Hazen-Williams* a los regímenes hidráulicos mejoran la precisión de valores obtenidos, evaluando la variación del coeficiente C junto con el diámetro y mostrando el anacronismo generado por esta ecuación en tubos de diferentes materiales como: PVC (policloruro de vinilo) y polietileno de pequeño diámetro, expuestas o no a algún tipo de ajuste hidráulico (Alegret y Martinez, 2019).

El análisis de comparaciones de coeficientes “C”, y el conocer su variabilidad ante los valores prestablecidos en tablas y los encontrados en esta investigación, evaluados para diferentes diámetros, permite definir qué diámetros de tuberías se encuentran expuestos a diversos factores de diseño como la reducción de costos en las instalaciones, utilizando los diversos materiales de las tuberías comerciales (Rodríguez, y Benavides, 2021).

Para aplicar la comparativa, se implementó en la investigación modelaciones hidráulicas, las cuales son herramientas que logran una mayor efectividad para los diseños hidráulicos, de ingeniería sanitaria y demás (Pereira y De Padua Sousa, 1999), mejorando el manejo de la distribución de agua potable, así como también para describir matemáticamente el flujo en canales abiertos, ríos, zonas costeras y otros.

Anexando el carácter crítico, analítico y técnico se ejecuta la elección del tipo de modelo hidráulico a emplear, pudiendo ser de simulación numérica, determinísticos, estocásticos o modelos de planificación y manejo; el acompañamiento de softwares hidráulicos facilita la implementación y modificación del modelamiento antes de ser llevado al escenario real. (Rodríguez, y Benavides, 2021)

El análisis que se efectúa en una modelación mediante los diferentes tipos modelos hidráulicos, se consideran herramientas con mayor confiabilidad y eficaz en la toma de decisiones para suministrar agua potable (Chuquín, 2018). EPANET es uno de los

softwares con mayor utilización, por su manejabilidad, su libre acceso y su aplicación en pérdidas de cargas y parámetros hidráulicos, que, en diseño se pueden emplear varios métodos de pérdidas de cargas, a diferencia de WATERCAD, software por el cual se paga licencia y su complejidad es mayor al ya mencionado antes (Morelos, y Hernández, 2017).

Por ello la presente investigación tiene como objetivo: Validar el coeficiente de rugosidad de *Hazen-Williams* para tuberías de diferentes diámetros, mediante modelación hidráulica; para cumplir el objetivo principal se debe: Revisar la información bibliográfica correspondiente a la influencia del coeficiente de rugosidad e *Hazen-Williams* en tuberías de diferentes diámetros; Elaborar un modelo hidráulico para la comprobación de los coeficientes *C* de *Hazen-Williams*; y Analizar la variación existente entre los coeficientes *C* de *Hazen-Williams* de rugosidad mediante la modelación hidráulica entre los diferentes tipos de fabricantes de tuberías.

DISEÑO METODOLOGICO

MATERIALES Y METODOS

Área de estudio

La presente investigación se llevó a cabo en la ciudad de Portoviejo, perteneciente a la provincia de Manabí, en Ecuador, teniendo como sede del prototipo hidráulico, mi domicilio, en un laboratorio de sala implementado.

Equipos y Materiales

- Software
- Computadora.
- Flexómetro
- Calibrador
- Cronometro
- Recipiente de 20 litros
- Equipo de modelación.
- Suministros de oficina.

MÉTODOS

VARIABLES CONSIDERABLES EN LA INVESTIGACIÓN

- Revisar información bibliográfica sobre la influencia del coeficiente de rugosidad de *Hazen-Williams* en tuberías de diferentes diámetros.
- Caudal Aforo volumétrico
- Comprobación de los coeficientes C de *Hazen-Williams* mediante valores del modelado hidráulico
- Analizar la variación existente entre los coeficientes C de *Hazen-Williams* de rugosidad mediante la modelación hidráulica entre los diferentes tipos de

fabricantes de tuberías.

Revisar información bibliográfica sobre la influencia del coeficiente de rugosidad e Hazen-Williams en tuberías de diferentes diámetros.

La manera en que las diferentes medidas de diámetros de una tubería influyen directamente en el coeficiente de rugosidad para la ecuación de Hazen-Williams, específicamente de material utilizado en el modelamiento (PVC), se asienta en la presente investigación, con base a sus resultados.

Se pudo determinar que varias investigaciones desarrollada por diversos investigadores, se centran en la manera en cómo actúa el comportamiento del coeficiente de rugosidad, adaptándose y obteniendo resultados para diferentes diámetros comerciales con mayor exactitud, de manera estándar, todo esto gracias a prototipos y estudios realizado a lo largo del tiempo, los primeros coeficientes se los determinó en el año 1905 (Breña, y Valdés, 2019).

Al hablar formulas, una investigación desarrollada por SENAGUA, 2016, establece que, para el cálculo de tuberías de presión se emplean fórmulas generalmente aceptadas según el margen de error como son las fórmulas de *Hazen-Williams*, *Darcy Weisbach*, *Colebrook-White*, y otras, tomando en cuenta también el material de la tubería o conducto.

Caudal aforo volumétrico

Uno de los conceptos principales adquiridos y recordados desde siempre al dedicarse a la ingeniería en aguas o ingeniería hidráulica, es la definición de caudal; se puede definir el caudal como la cantidad de fluido que circula a través de una sección por unidad de tiempo. Existen un sin número de fórmulas para su obtención, para la investigación se determinó el uso de la ecuación del flujo volumétrico para caudales menores.

Para obtener caudales pequeños de una forma muy sencilla, se deberá enfocar en la medición directa del mismo, calculado en base a la incidencia del tiempo, es decir,

cuánto tarda en llenar un recipiente con un volumen ya establecido, el cual se obtendrá mediante la ecuación de flujo volumétrico (Hudson, 1997) (Tabla 1).

Tabla 1

Ecuación de Flujo Volumétrico

FÓRMULA	DESCRIPCIÓN
$Q = \frac{V}{t}$	<p><i>Donde:</i></p> <p><i>Q: Caudal</i></p> <p><i>V: Volumen</i></p> <p><i>t: Tiempo</i></p>

Fuente: (González, 2016)

Procedimiento para obtener el caudal

Mediante un aforo volumétrico en un recipiente de volumen conocido y la medición del tiempo de llenado del mismo, se obtuvo el caudal de 10 muestras estadísticas. Posteriormente, se procedió a determinar un promedio o media de los datos obtenidos, para así obtener el caudal de diseño empleado para la aplicación de la ecuación en la comprobación del coeficiente C, para la fórmula de *Hazen-Williams* (Tabla 2).

Tabla 2

Ecuación de C, de Hazen-Williams

FÓRMULA	DESCRIPCIÓN
$hf = \frac{10.679 * Q^{1.852} * L}{C^{1.852} * D^{4.87}}$ $hf * C^{1.852} * D^{4.87} = 10.679 * Q^{1.852} * L$ $C = \left[\frac{10.679 * Q^{1.852} * L}{hf * D^{4.87}} \right]^{\frac{1}{1.852}}$	<p><i>Donde:</i></p> <p><i>Q: Caudal</i></p> <p><i>hf: Perdida de cargas</i></p> <p><i>C: Coeficiente de Fricción, Hazen-Williams</i></p> <p><i>D: Diámetro</i></p> <p><i>L: Longitud</i></p>

Fuente: (Yildirim & Özger, 2009)

Comprobación de los coeficientes C de *Hazen-Williams*, mediante valores del modelado hidráulico

Para la comprobación de los coeficientes de rugosidad, coeficiente “ C ” de Hazen-Williams, se empleó el prototipo número 1 del modelo hidráulico que se muestra en el Anexo no1., mismo que constituye la representación gráfica del modelo implementado de manera física en el área de estudio, mi domicilio.

Procedimiento para comprobar el factor C de *Hazen-Williams* mediante los valores del modelo hidráulico

Para determinar el valor C , como primer punto se procedió a despejar la ecuación original de *Hazen-Williams*, posteriormente de los datos recolectados del modelamiento hidráulico, volumen y tiempo de llenado, empleando el método de aforo volumétrico, se obtuvo el caudal.

El modelo hidráulico, consta entre sus componentes de piezómetros y un flexómetro adaptado, utilizados para la lectura de las pérdidas de cargas, que no son más que las diferencias de alturas. Otros de los parámetros necesarios para la obtención del coeficiente de rugosidad, son las características de las tuberías implementadas en el modelo hidráulico, con el conocimiento de su diámetro y longitud se procedió a determinar el valor de C mediante la ecuación reflejada en la Tabla 2; el mismo procedimiento se realizó para cada una de las tuberías con los diferentes diámetros empleados.

Análisis de la variación existente entre los coeficientes C de *Hazen-Williams* de rugosidad mediante la modelación hidráulica entre los diferentes tipos de fabricantes de tuberías.

Se analizó la variación entre los coeficientes C obtenidos mediante la aplicación del software WATERCAD con sus diferentes tipos de tuberías y diámetros, frente a los coeficientes de rugosidad expuestos por los diferentes fabricantes de tuberías, analizando así la variación con respecto al modelo hidráulico realizado en el área de estudio.

MANEJO DE MODELO HIDRAULICO

Funcionamiento del modelado

En el ensayo realizado se inició por determinar el valor del caudal en el sistema hidráulico, se tomaron aproximadamente 10 intervalos de tiempo con un promedio de 31 segundos aproximadamente, para un volumen de llenado de 3 litros, así se pudo determinar el caudal promedio en el sistema, empleando el método de aforo volumétricos. Mismo procedimiento para los diferentes diámetros de tuberías en las cuales se observó la tendencia continua del caudal de diseño, ya que cabe recalcar que el diámetro de salida desde el reservorio era estándar, es decir constante, adaptándose a reducciones para poder acoplarse, determinando así un caudal promedio de 0.09 l/s.

Posteriormente se tomaron las lecturas de los piezómetros, para así poder determinar las alturas y poder obtener el valor para las pérdidas de cargas necesarias para proceder en la determinación del valor C (coeficiente de rugosidad) mediante el despeje de la fórmula de pérdidas de carga de Hazen-Williams; para la obtención de resultados para el objetivo propuesto, se realizó el cálculo de coeficiente para cada uno de los diámetros propuestos, que van desde ½ de pulgadas hasta 2 pulgadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Revisión de información bibliográfica sobre la influencia del coeficiente de rugosidad e *Hazen-Williams* en tuberías de diferentes diámetros.

Los valores de los coeficientes de rugosidad utilizados tradicionalmente en el diseño hidráulico de tuberías para el transporte de agua a presión, han sido determinados sin algún criterio uniforme y sin un apoyo experimental consistente, como fue citado en la introducción de la investigación. Esto hace que exista una gran variación de valores propuestos en bibliografía científica y técnica de los parámetros representativos de la rugosidad, tomando como referencia los valores de rugosidad de teorías como Manning y la de esta investigación Hazen-Williams (Bombardelli y García, 2003).

A lo largo de los tiempos, se ha asumido que la rugosidad es una constante que depende únicamente del material de la tubería (Ozger y Mays, 2004). Esta deducción no ha sido demostrada, vislumbrando que puede variar en función de otros parámetros como son las condiciones de flujo, el diámetro de la tubería, el tiempo en servicio de la tubería, y otros.

A partir de las tablas expuestas en el libro *Hydraulic Tables*, 1905, se puede evidenciar que los valores de rugosidad o valores de coeficiente C de Hazen-Williams oscilan de entre los 95 a los 140 dependiendo del material de la tubería. De la misma manera se revisó la información bibliográfica respectiva, y se pudo determinar que los valores mostrados en la tabla 3 y la tabla 4 fueron obtenidas de fuentes mayormente empleadas y por ende de mayor confiabilidad, sirviendo como base para la realización de muchas investigaciones presentadas a lo largo de los años desde que fue modificado por primera vez el coeficiente de Chezy en la ecuación de *Hazen-Williams*.

La Tabla No 4 es una adaptación utilizada en nuestro país Ecuador, estudiada minuciosamente, por lo cual es confiable su uso en el diseño de cualquier modelamiento hidráulico que se vaya a realizar en cuanto a cuestiones de pérdidas de cargas.

Relacionando ambas tablas se puede observar una similitud, ya que por lo general son valores estándar ya determinados y los cuales son los empleados para los diseños hidráulicos en pérdidas de cargas. Uribe (2014), recalca que entre mayor sea el valor de coeficiente C, las paredes son más lisas, mayor será su caudal por el cual transite, por eso es necesario tener en cuenta una buena referencia bibliográfica cuando se va a diseñar un sistema de agua.

Tabla 3*Valores de C de Hazen-Williams, para diferentes materiales*

VALORES C DE DIFERENTES MATERIALES	
Materiales	C
Tuberías rectas y muy lisas	140
Tuberías de fundición lisas y nuevas	130
Tuberías de fundición usadas y de acero roblonado nuevas	110
Tuberías de alcantarillado vitrificadas	110
Tuberías de fundición con algunos años de servicios	100
Tuberías de fundición en malas condiciones	80

Fuente: (Giles, R.V., 1994)**Tabla 4***Coefficiente Rugosidad SENAGUA*

TIPO DE CONDUCTO	COEFICIENTE C
Acero corrugado	60
Acero galvanizado	125
Asbesto – cemento	140
Cobre	130
PVC	140
Hormigón Liso	130
Hormigón Ordinario	120
Hierro fundido nuevo	130
Hierro fundido viejo	90

Fuente: (SENAGUA, 2016)

Elaborar un modelo hidráulico para la comprobación de los coeficientes C de Hazen Williams.

El modelo hidráulico tomado en consideración al ser escaso en complejidad, y con la presencia de pocas pérdidas de carga, facilitaron el cálculo de los coeficientes C de Hazen Williams para tuberías de PVC de diferentes diámetros.

Este, fue implementado considerado como el área de estudio. El modelo hidráulico consta de un reservorio o cisterna, así como también de una bomba, dos piezómetros trabajando a la par con un flexómetro, del rebose y por supuesto como componente principal, las tuberías.

Al analizar los resultados mostrados en la Tabla No 5, poniendo en funcionamiento el modelo, muestran un descenso en el coeficiente C de Hazen-Williams o coeficiente de rugosidad frente al referencial que fue empleado en el prototipo (150), este descenso se da entre mayor es el diámetro, y la pérdida es mucho menor a medida que el diámetro aumenta. El valor del coeficiente C oscila entre 92,78 y 138,74 con un caudal fijo obtenido mediante un promedio de las muestras presentadas, de $9,28 \text{ E-}05 \text{ m}^3/\text{s}$.

El caudal expuesto en la Tabla resulta del promedio de caudales obtenidos para 10 muestras, relacionados al tiempo de llenado y al volumen del reservorio. La longitud de la tubería de PVC empleada corresponde a 3.00 metros y en cuanto a los diámetros, fueron empleados diámetros comerciales.

La curva de tendencia polinómica de las variables coeficiente /diámetro (Grafico 1) permiten visualizar la tendencia decreciente de relación entre variables a medida que el diámetro aumenta y la rugosidad disminuye.

Otros autores como Alegret y Martinez (2019), mencionan que los conductos más lisos tienen valores más altos del coeficiente C en comparación a los más rugosos; en conclusión, que este depende únicamente de la condición de lisura de la superficie del conducto y la edad de este. Para tuberías PVC el coeficiente de Hazen-Williams según las tablas elaboradas por diversos autores según valores estándares de literatura, corresponde a un valor de entre 140 -150; que comparados a los obtenidos en la presente investigación con valores de 92,78 a 138,74, podemos observar que se encuentran por debajo de lo establecido por otros autores.

Tabla 5

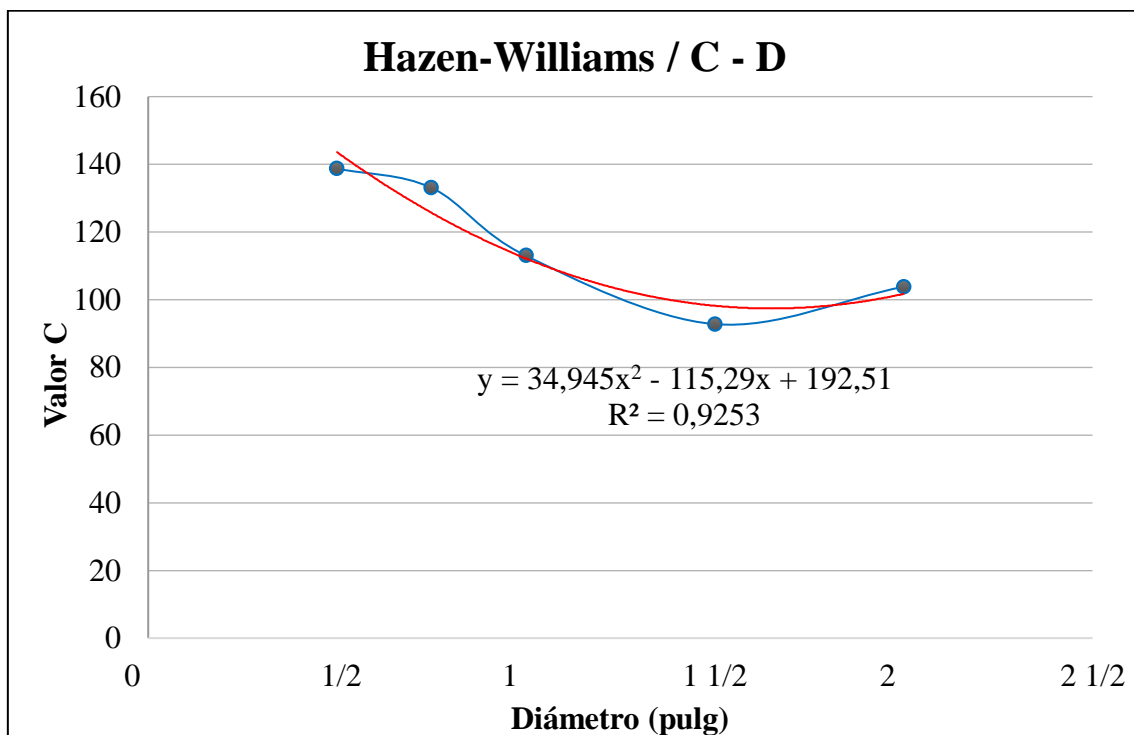
Valores (Coeficiente, Perdidas de cargas, Longitud, Caudal, Diámetro)

D (in)	C	hf(m)	L(m)	Q(m ³ /s)	D(m)
1/2	138,73606	0,2	3	9,23785E-05	0,0127
3/4	133,05057	0,03	3	9,23785E-05	0,01905
1	113,00665	0,01	3	9,23785E-05	0,0254
1 1/2	92,783312	0,002	3	9,23785E-05	0,0381
2	103,8355	0,0004	3	9,23785E-05	0,0508

Fuente: Propia

Gráfico 1

Determinación de la curva de tendencia polinómica, variables C/D (Coeficiente/Diámetro)



Analizar la variación existente entre los coeficientes C de Hazen Williams de rugosidad mediante la modelación hidráulica entre los diferentes tipos de fabricantes de tuberías.

La modelación hidráulica sistemática se llevó a cabo empleando el software WaterCAD, software de análisis y modelado de sistemas de distribución de agua, utilizado en este caso para la obtención de valores correspondientes a pérdidas de carga, para el posterior despeje de fórmula de coeficiente de rugosidad.

Uno de las variables más importantes para realizar el modelamiento en WaterCAD, es el caudal, siendo para la investigación el mismo que se obtuvo en base al modelamiento hidráulico físico en el área de estudio.

De igual manera se registró el valor de coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams en base a lo que establecen las investigaciones y catálogos de los fabricantes de tuberías. Es así como se determinó de cuánto es la variación de cada uno de los coeficientes empleados, recordando que para el software se utilizó 150 por ser la tubería de material PVC como lo establece la normativa.

La tendencia muestra que entre más aumenta el diámetro, menor es la pérdida de carga en el sistema, también se puede establecer que dicho software trabaja a presión y a diferencia de modelo hidráulico físico, puede haber cierto rango de variación, al no ser un sistema 100% exacto en cuanto a su distribución presurizado. Según Arreguín et al. (2010), en los últimos años es más frecuente la utilización de software al momento de realizar una modelación hidráulica, pero siempre tienen una tendencia a variar por factores de diseños como diámetros, velocidades, y demás.

En la tabla 6 se puede visualizar la comparación de coeficientes de rugosidad o coeficientes C de Hazen-Williams empleados en el prototipo en WaterCAD, frente a los del prototipo físico y los de fabricantes.

Tabla 6

Comparación de valores de coeficiente C de Hazen Williams empleados en el software WaterCAD ante los obtenidos del prototipo físico y los establecidos por fabricantes.

D (in)	C (calculado)	Prototipo Físico	Fabricantes (PVC)	Empleada en el Software
1/2	138,73606	138,73	140-150	150
3/4	133,05057	133,05	140-150	150
1	113,00665	113,01	140-150	150
1 1/2	92,783312	92,78	140-150	150
2	103,8355	103,84	140-150	150

Fuente: Propia

CONCLUSIONES

- La información bibliográfica con respecto al coeficiente C o coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams es muy amplia, estas demuestran que, en base a estudios sus valores son establecidos universalmente, por lo que se han mantenido los mismos valores expuestos desde sus inicios en el año 1905 y que han sido utilizados para las modelaciones y diseños hidráulicos de años posteriores a su definición.
- La elaboración del modelo hidráulico implementado en el área de estudio, al no presentar complejidad alguna, permitió que se obtuvieran valores que ayudaron con la obtención del caudal que pasaba por las tuberías, de las cuales al conocer el valor de sus características y después del despeje de la fórmula de pérdidas de carga de Hazen-Williams, arrojaron valores de rugosidad que oscilan entre 92,80 y 138,73.
- Al implementar como herramienta extra el uso del software WaterCAD, y considerando que el material de las tuberías empleadas en el prototipo físico, se registró para el posterior análisis un valor de rugosidad de 150. La variación frente a los valores expuestos por los catálogos de fabricantes de tuberías con rugosidad de 140 – 150 y a los resultantes del despeje del prototipo físico con valores de 92,80 a 138,73, son relativamente cercanos, es decir, su variación al menos con los fabricantes es casi nula.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alegret, E., & Martínez, Y. (2019). Coeficiente de Hazen-Williams en función del número de Reynolds y la rugosidad relativa. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 40(3), 41-55.
- Arreguín, F., Alcocer, V., y Hernández, D. (2010). Modelación de redes de agua potable con enfoques determinísticos y estocásticos *Tecnología y ciencias del agua*, 1(4), 119-136.
- Bombardelli, F., y García, M. (2003). Diseño hidráulico de tuberías de gran diámetro. *Revista de ingeniería hidráulica* , 129 (11), 839-846.
- Chuquín, N. (2018). Mathematical Modeling of The Hydraulic System. *Perfiles*, 37-49.
- Cortez, P., Tzatchkov, V., Rodríguez, J. M., Caldiño, I., Figueroa, J., & Pellegrini, F. (2016). Estudio del coeficiente de rugosidad de tuberías etapa II.
- Flechas, R. (2011). *Efecto de la ecuacion de Hazen-williams vs Darcy Weisbash*. Bogota: Universidad de los Andres.
- Gavilánez, L. (2019). *Incidence of the pressure on roughness coefficient C of Hazen-Williams. Tecnología y Ciencias Del Agua*,. Recuperado de <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-08>
- Giles, R. (1994). *Mecánica de los Fluidos e Hidráulica Vol(3)*. España. McGraw - Hill.
- Hudson, N. (1997). *Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la Escorrentía*. Roma: FAO.

- Morelos, R., & Hernández, R. (2017). Modelación hidráulica de la red de distribución de agua potable en una ciudad Mexicana EPANET. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 4(2), 120.
- Ozger, S., y Mays, L. (2004). Optimal location of isolation valves in water distribution systems: a reliability/optimization approach. *Water resource systems management tools*, 7.
- Pereira, D., y De Padua Sousa, A. (1999). Hidráulica de tubos de bambu: coeficiente C de Hazen-Williams. *IRRIGA*, 80-94.
- Rodríguez, W., y Benavides, H. (2021). Modelación hidráulica y calibración de redes de distribución de agua potable. *Tecnología y ciencias del agua*, 12(4), 01-41.
- Santos, I., Bermúdez, J., López, F., Puig, V., y Torres, F. (2018). Estimación experimental de la rugosidad y del factor de fricción en una tubería. In *Memorias del Congreso Nacional de Control Automático* (pp. 489-494).
- SENAGUA. (2016). *Normas Para Estudio De Sistemas De Abastecimiento De Agua Potable Y Disposición De Aguas Residuales, Para Poblaciones Mayores a 1000 Habitantes*. Obtenido de http://www.agua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/04/norma_urbana_para_estudios_y_disenos.pdf
- Uribe, J. (2014). Estudio sobre el uso de la ecuación de Hazen-Williams vs la ecuación de Darcy-Weisbach en tuberías de gran diámetro (Sistemas Matrices) y en tuberías primarias de bombeo. *CIACUA*, 1-275.

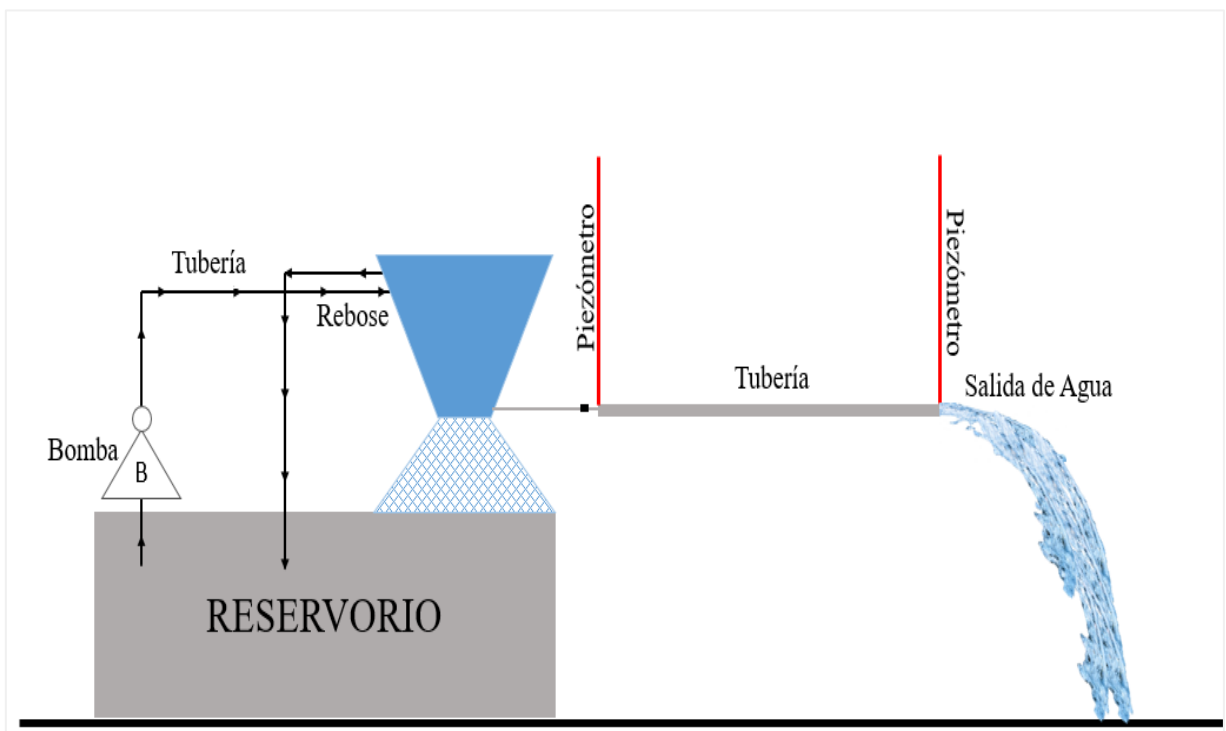
Yildirim, G., & Özger, M. (2009). Enfoque neuro-difuso para estimar el coeficiente de fricción de Hazen-Williams para tuberías de polietileno de diámetro pequeño. *ELSEVIER*, 593-599.

ANEXOS

Anexo No 1: Prototipo del modelo hidráulico empleado

Gráfico 1

Diseño del prototipo del modelo hidráulico empleado



Anexo No. 2: Determinación de material del valor C en ecuación de Hazen-Williams

Gráfico 2

Determinación del material para el valor de C en ecuación de Hazen-Williams

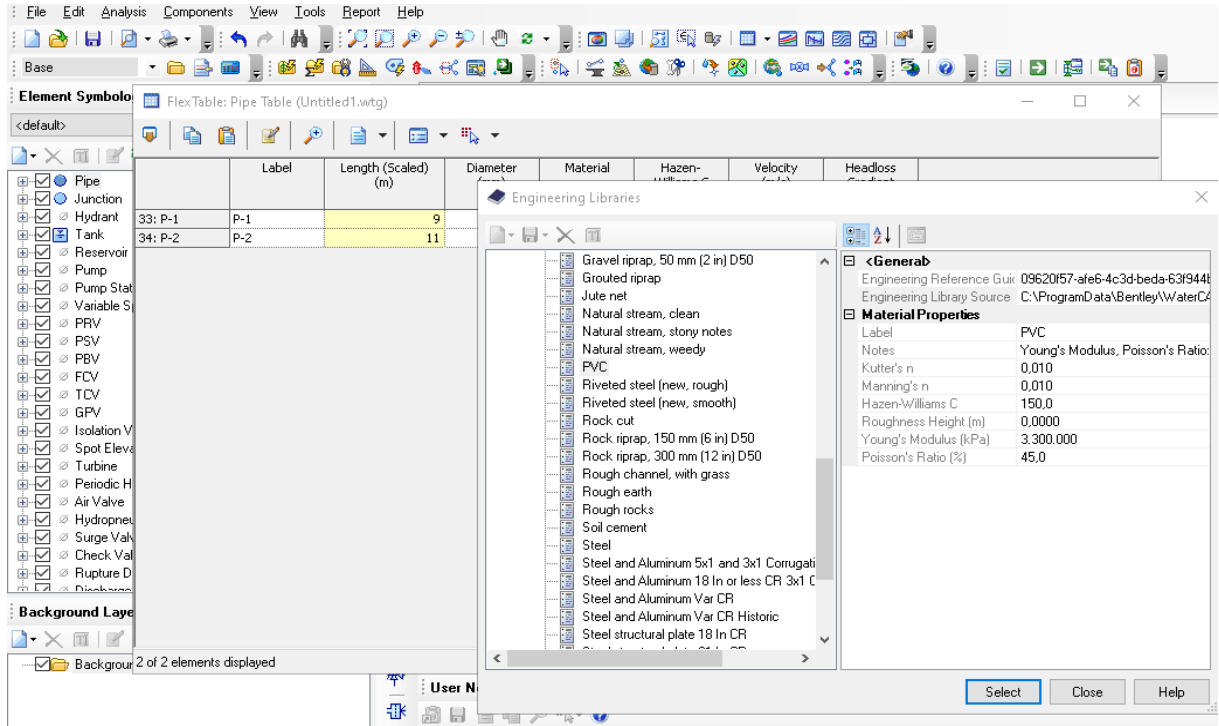


Gráfico 3

Resultados en diámetro de 1/2 pulgadas

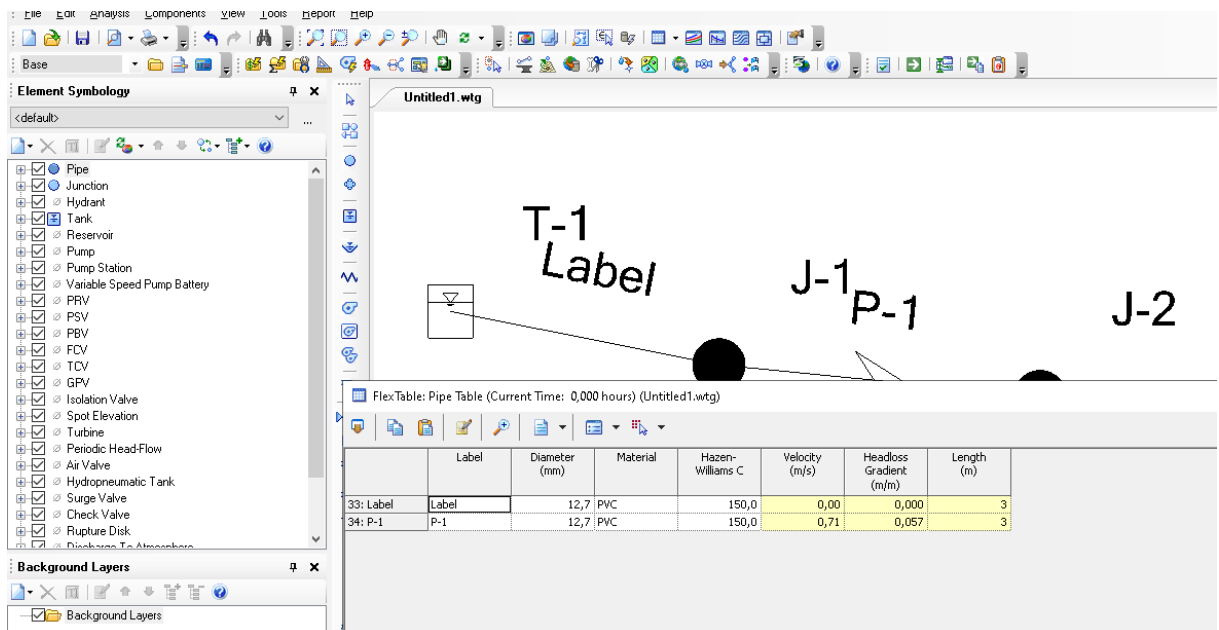


Gráfico 4

Resultados en diámetro de 3/4 pulgadas

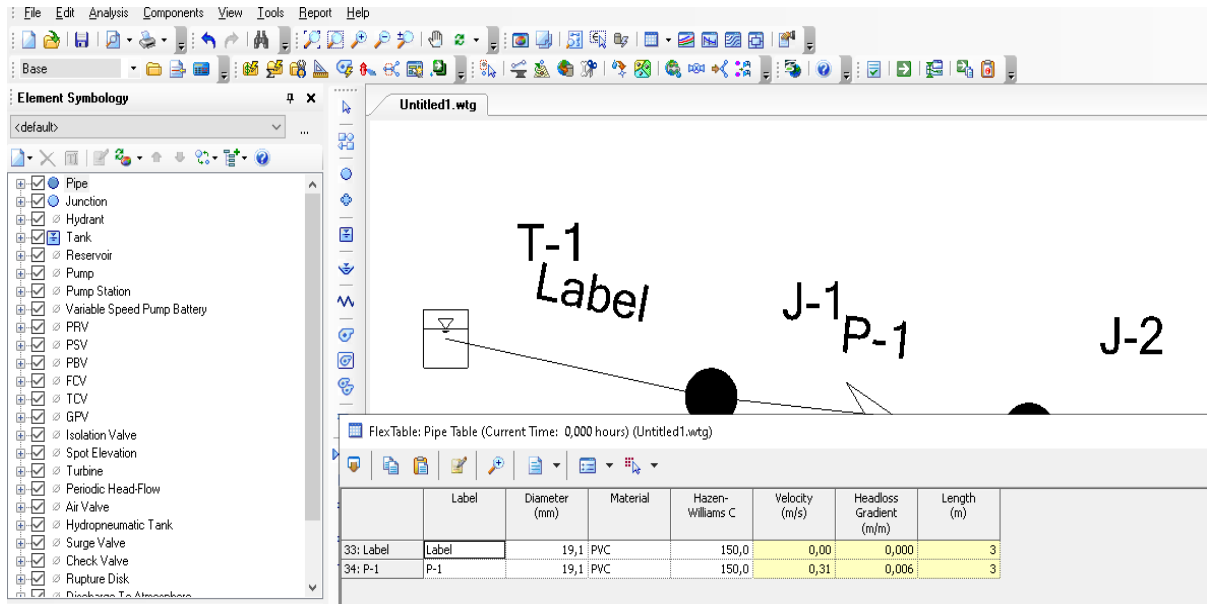


Gráfico 5

Resultados en diámetro de 1 pulgadas

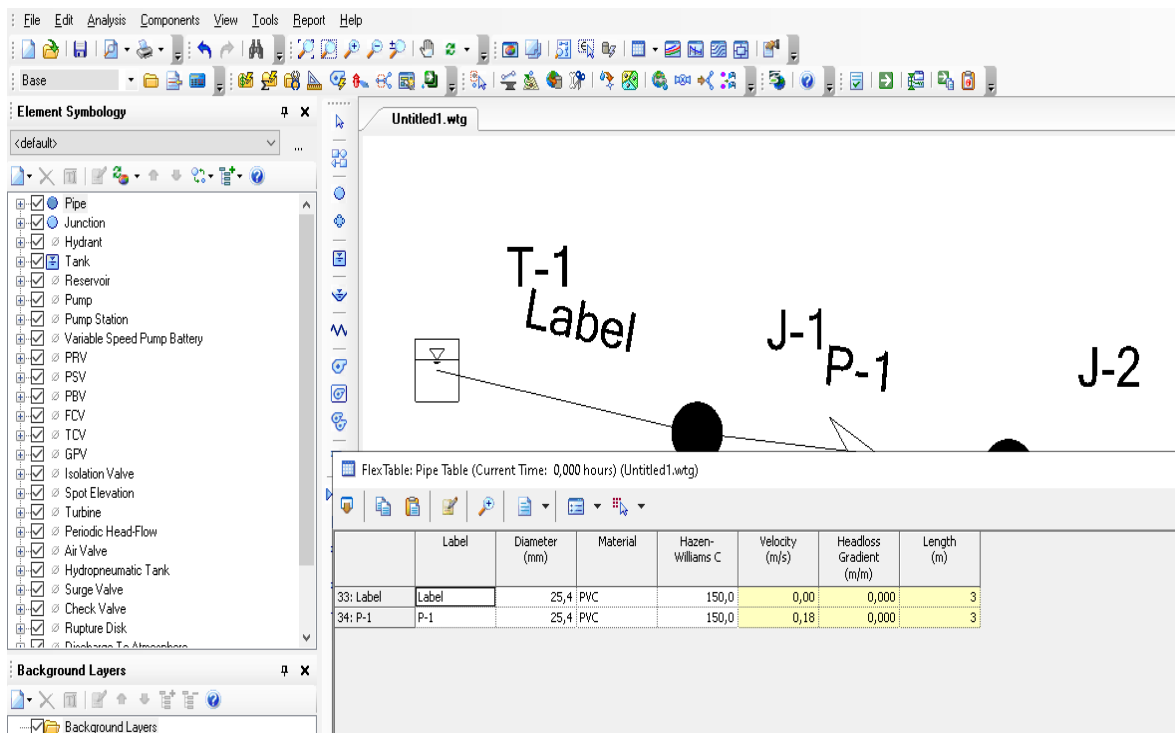


Gráfico 6

Resultados en diámetro de 1 ½ pulgadas

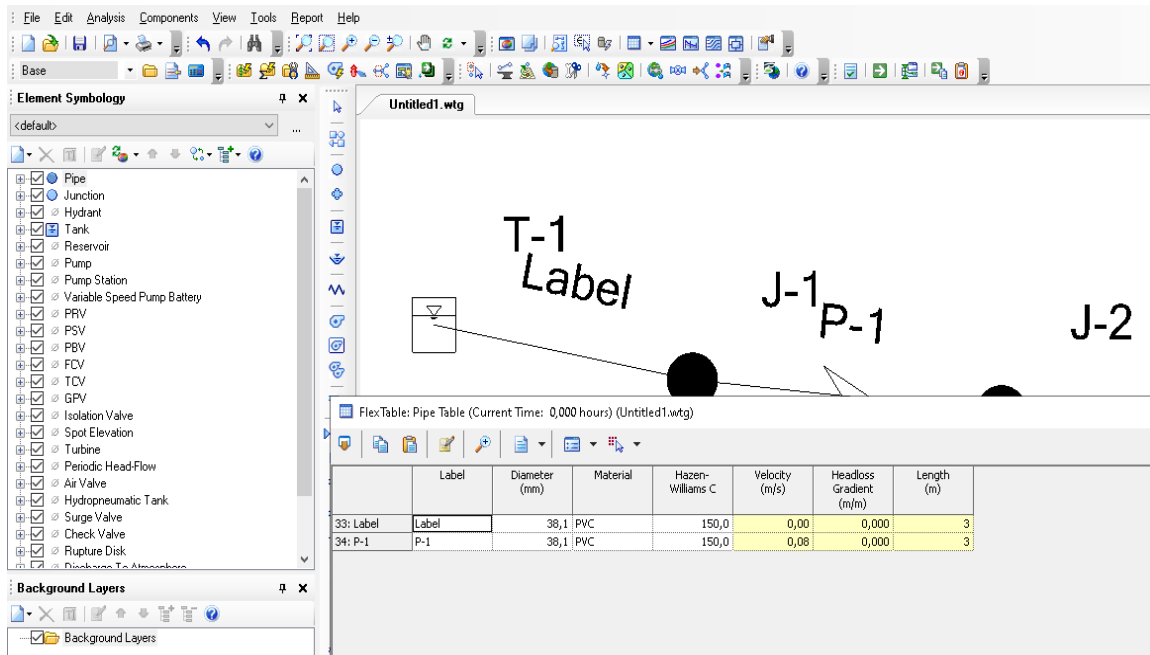
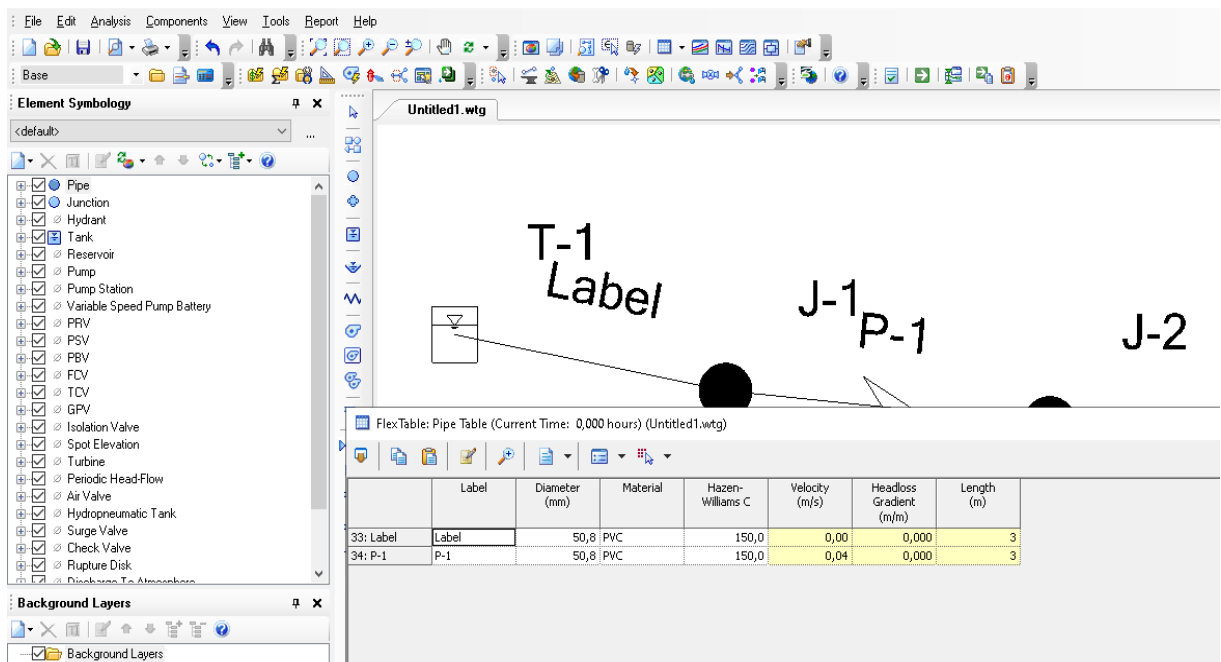


Gráfico 7

Resultados en diámetro de 2 pulgadas



Anexo No 3: Modelo hidráulico

Gráfico 8

Secciones de tuberías empleadas en el prototipo físico



Gráfico 9

Elementos del Prototipo diseñado



Gráfico 10

Conexiones empleadas para la instalación del prototipo y toma de datos



Gráfico 11

Piezómetro para la lectura de alturas y el cálculo de pérdidas de carga



Gráfico 12

Instalación del prototipo físico en el área de estudio

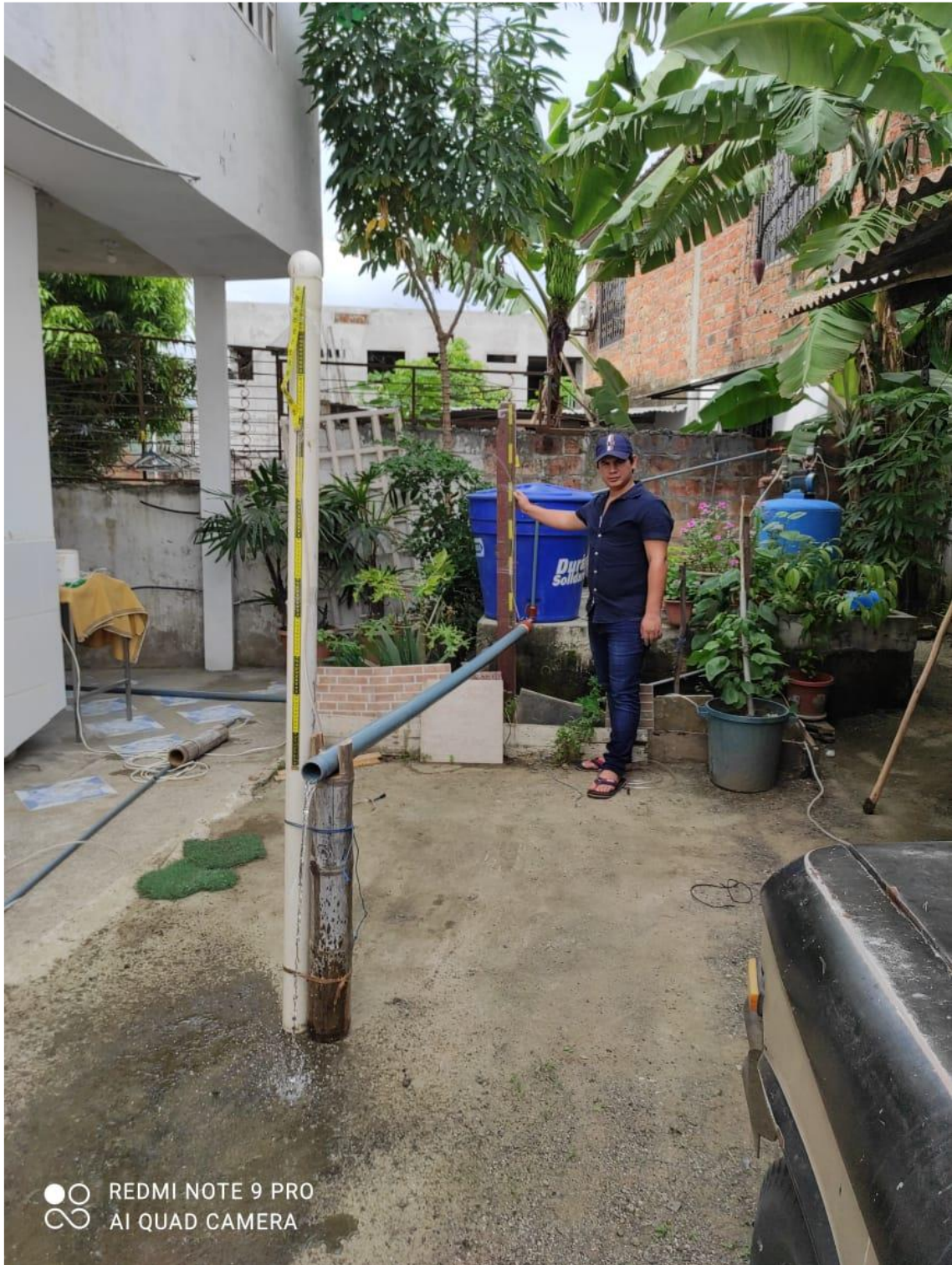


Gráfico 13

Instalación de piezómetros en el prototipo físico

