

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Ambiental



TESIS

Análisis del caudal óptimo para el funcionamiento a tubo lleno en sistemas de drenaje pluvial sifónicos de edificaciones

Para obtener el título profesional de Ingeniero Sanitario.

Elaborado por

Julian Gustavo Adolfo Vasquez Peña

 [0000-0002-2699-1450](https://orcid.org/0000-0002-2699-1450)

Asesor

Ing. Roger Edmundo Salazar Gavelán

 [0009-0002-4663-4888](https://orcid.org/0009-0002-4663-4888)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Vasquez[1]
Referencia/Reference	[1] J.G.A. Vasquez, “ <i>Análisis del caudal óptimo para el funcionamiento a tubo lleno en sistemas de drenaje pluvial sifónicos de edificaciones</i> ” [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Vasquez, 2025)
Referencia/Reference	Vasquez, J.G.A. (2025). <i>Análisis del caudal óptimo para el funcionamiento a tubo lleno en sistemas de drenaje pluvial sifónicos de edificaciones</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

A mis padres Primo Julian V.C.y María Jesús P.R. por su apoyo a lo largo de este proyecto siempre impulsándome para lograr mis metas en el ámbito personal y profesional

Agradecimientos

A lo largo de este proyecto, he recibido el apoyo y la colaboración de muchas personas a quienes me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento.

- Al ingeniero Roger Edmundo Salazar Gavelán por su apoyo y asesoramiento a la elaboración de la presente tesis
- A Ivonne Pando por su apoyo incondicional y asistencia al desarrollo de la presente investigación.
- Al ingeniero Miguel Ángel Zubiaur Alejos, director del Laboratorio Nacional de Hidráulica por su ayuda al brindar el espacio de experimentación contribuyendo así a la investigación científica del Perú.
- A los trabajadores del Laboratorio Nacional de Hidráulica: Srta Yrma Alpaca Guerra, Fredy Sánchez Pinarez, Segundo Farro Cachay, Germán Quinte Saenz, Ricky López Amancio, Lindey Alvarado Olano y Gloria Zevallos López. Todos ellos por el buen trato y colaboración, dando un buen ambiente a lo largo del desarrollo de la investigación.
- A mi amigo Junior Franklin Toribio Tapia por su asistencia en el desarrollo del experimento a pesar de las dificultades del mismo ambiente de trabajo.

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo determinar el caudal óptimo en un sistema de drenaje sifónico, definido como el caudal máximo alcanzable al lograr el cebado completo del sistema, evitando el ingreso de aire. Para ello, se implementó un experimento con una motobomba que impulsa agua hacia un recipiente ubicado a 6 metros de altura, conectado a una tubería horizontal de 2.5 m y una vertical de 5.5 m. Se usó un plato antivortex para evitar turbulencias y un manovacúmetro en la línea horizontal para medir la presión.

Se realizaron pruebas con tuberías de 2", 1½", 1¼" y 1", obteniéndose caudales experimentales de 5.71 l/s, 3.63 l/s, 1.94 l/s y 0.92 l/s, respectivamente. Para asegurar la mínima presencia de aire, se llenó el recipiente hasta un punto de referencia y se detuvo la bomba antes de iniciar la medición.

Los cálculos se realizaron con la ecuación de Bernoulli y la de Darcy-Weisbach, usando el factor de fricción de Colebrook-White, mediante un proceso iterativo programado. Los caudales teóricos fueron 5.82 l/s, 3.44 l/s, 1.84 l/s y 0.88 l/s, con errores del 1.91%, 5.25%, 5.20% y 4.25%, validando la precisión del modelo al no haber aire.

Las presiones experimentales fueron de -0.40 bar para los tres primeros diámetros y -0.50 bar para Ø1". Las presiones calculadas fueron -0.35, -0.42, -0.40 y -0.37 bar, con errores de 12.03%, 7.11%, 0.12% y 25.94%, respectivamente.

Palabras clave: Drenaje sifónico, caudal optimo, presión negativa, cebado.

Abstract

This research aims to determine the optimal flow rate in a siphonic drainage system, defined as the maximum achievable flow when the system is fully primed and free of air. The experiment involved a motor pump delivering water to a container placed 6 meters above ground level, connected to a 2.5 m horizontal and a 5.5 m vertical pipe. An anti-vortex plate was installed to prevent air entry, and a manovacuumeter was used in the horizontal section to measure pressure.

Tests were conducted using pipes of 2", 1½", 1¼", and 1" diameters, yielding experimental flow rates of 5.71 l/s, 3.63 l/s, 1.94 l/s, and 0.92 l/s, respectively. To minimize air presence, the container was filled to a reference level and the pump was stopped before measuring.

Flow calculations were based on Bernoulli's equation for energy conservation and the Darcy-Weisbach equation with the Colebrook-White formula for head loss, solved iteratively through a programmed routine. The theoretical flow rates obtained were 5.82 l/s, 3.44 l/s, 1.84 l/s, and 0.88 l/s, with relative errors of 1.91%, 5.25%, 5.20%, and 4.25%, confirming that air-free conditions yield optimal flow.

Measured vacuum pressures were -0.40 bar for the first three diameters and -0.50 bar for the 1" pipe. Calculated pressures were -0.35, -0.42, -0.40, and -0.37 bar, with relative errors of 12.03%, 7.11%, 0.12%, and 25.94%, respectively.

Keywords: Siphonic drainage, optimal flow rate, negative pressure, priming.

Tabla de Contenido

Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Resumen	v
Abstract	vi
1. Capítulo I: Introducción	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Antecedentes investigativos	2
1.2.1. Antecedentes nacionales	2
1.2.2. Antecedentes Internacionales	2
1.3. Planteamiento de la realidad problemática	3
1.4. Formulación del problema	4
2.1. Objetivo principal	5
2.2. Objetivos secundarios	5
2.3. Hipótesis	5
2.4. Variables	5
2.4.1. Variables dependientes	5
2.4.2. Variables independientes	5
3. Capítulo II: Marco Teórico	6
3.1. Sistema de drenaje	6
3.2. Elementos de un sistema de drenaje	6
3.2.1. Elementos receptores	6
3.2.2. Elementos verticales	7
3.2.3. Elementos horizontales	7
3.3. Tipos de sistema de drenaje	7
3.3.1. Drenaje convencional	7

3.3.2.	Drenaje sifónico	9
3.4.	Tipos de sumideros sifónicos	10
3.4.1.	Sumidero de sifón tipo campana	10
3.4.2.	Sumidero con plato antivortex.....	11
3.5.	Cebado en cola de tubería	12
3.6.	Sumergencia crítica.....	12
3.7.	Plato antivortex.....	13
3.8.	Cebado.....	14
3.9.	Cavitación	15
3.10.	Cálculo hidráulico en sistemas de drenaje sifónico.....	16
4.	Marco legal	19
4.1.	Normativa nacional.....	19
4.2.	Normativa internacional.....	21
5.	Capítulo III: Metodología.....	22
5.1.	Ubicación	22
5.2.	Distribución y elementos del experimento	23
5.3.	Almacenamiento de agua	25
5.4.	Sistema de bombeo.....	26
5.5.	Línea de succión	27
5.6.	Línea de impulsión	27
5.7.	Recipiente y sumidero	28
5.8.	Bajante	31
5.9.	Medición de presiones.....	32
5.10.	Puesta en marcha	33
5.11.	Medición de caudal en la bajante	34
5.12.	Ensayos generales.....	37

5.13.	Resultados	39
5.13.1.	Escenario 1: $D = \varnothing 2"$	40
5.13.2.	Escenario 2: $D = \varnothing 1\frac{1}{2}"$	41
5.13.3.	Escenario 3: $D = \varnothing 1\frac{1}{4}"$	42
5.13.4.	Escenario 4: $D = \varnothing 1"$	43
6.	Capítulo IV: Calculo y análisis de resultados	44
6.1.	Consideraciones previas para el calculo.....	44
6.2.	Diagrama de flujo para el cálculo del caudal óptimo	50
6.3.	Calculo hidráulico de las diferentes pruebas	51
6.3.1.	Coeficiente K para pérdida de carga locales.....	51
a.	Estrechamiento brusco	51
b.	Ensanchamiento brusco	51
c.	Codos	52
d.	Sumidero	52
6.3.2.	Cálculos prueba tubería $\varnothing 2"$	53
6.3.3.	Cálculos prueba tubería $\varnothing 1\frac{1}{2}"$	54
6.3.4.	Cálculos prueba tubería $\varnothing 1\frac{1}{4}"$	55
6.3.5.	Cálculos prueba tubería $\varnothing 1"$	56
6.4.	Cálculo de presión.....	57
6.4.1.	Cálculos prueba de presión tubería $\varnothing 2"$	58
6.4.2.	Cálculos prueba de presión tubería $\varnothing 1\frac{1}{2}"$	59
6.4.3.	Cálculos prueba de presión tubería $\varnothing 1\frac{1}{4}"$	60
6.4.4.	Cálculos prueba de presión tubería $\varnothing 1"$	61
6.4.5.	Análisis de resultados.....	62
	Conclusiones	67
	Recomendaciones	68

Referencias bibliográficas	69
Anexos.....	72

Lista de Tablas

Tabla 1 Rango de altura del plato vs altura de agua	13
Tabla 2 Rango de diámetro del plato vs altura de agua	14
Tabla 3 Montantes de agua de lluvia	20
Tabla 4 Conductos horizontales para agua de lluvia	20
Tabla 5 Lista de Items.....	25
Tabla 6 Características de la Motobomba.....	26
Tabla 7 Resultados prueba Ø2"	40
Tabla 8 Resultados prueba Ø1½"	41
Tabla 9 Resultados prueba Ø1¼"	42
Tabla 10 Resultados prueba Ø1"	43
Tabla 11 Resultados y errores en tuberías principales (Caudal)	62
Tabla 12 Resultados y errores en tuberías principales (Velocidad).....	63
Tabla 13 Resultados y errores en colas de tuberías (Velocidad)	63
Tabla 14 Resultados y errores (Presión).....	65

Lista de Figuras

Figura 1 Instalaciones en FCR.....	4
Figura 2 Tipo de sumideros para drenaje.....	6
Figura 3 Esquema de sumidero en sistema de drenaje convencional.....	8
Figura 4 Ejemplo de Drenaje Convencional	9
Figura 5 Funcionamiento de sifón tipo campana.....	10
Figura 6 Esquema de Drenaje Sifónico.....	11
Figura 7 Formación de vórtice en sumidero sin plato antivortex.....	13
Figura 8 Posición del plato.....	14
Figura 9 Cebado tubería parcial (izquierdo) y total (derecho).....	15
Figura 10 Colapso de una bolsa de aire.....	16
Figura 11 Ubicación del Laboratorio Nacional De Hidráulica.....	22
Figura 12 Área del experimento	23
Figura 13 Vista desde arriba	23
Figura 14 Diagrama del experimento	24
Figura 15 Piscina portátil	25
Figura 16 Motobomba Werken.....	26
Figura 17 Línea de impulsión - Nivel Superior.....	27
Figura 18 Línea de impulsión - Nivel Inferior	28
Figura 19 Recipiente de Polipropileno 68L.....	29
Figura 20 Instalación de sumidero en recipiente	30
Figura 21 Posición del plato antivortex	30
Figura 22 Conexión de recipiente y bajante	31
Figura 23 Manovacuometro Nuova Fima	32
Figura 24 Manovacuometro Pressy	32
Figura 25 Acelerador de motobomba.....	33
Figura 26 Descarga libre en recipiente	34

Figura 27 Medición de volumen con flujómetro	35
Figura 28 Línea de nivel en recipiente	35
Figura 29 Pasos para experimentación.....	37
Figura 30 Bajante con manovacuometro desinstalado.....	38
Figura 31 Formación de burbujas en sistema	38
Figura 32 Formación de sifón sin plato antivortex	39
Figura 33 Diagrama de flujo para cálculo.....	50
Figura 34 Diagrama del experimento para cálculo de presión.....	57
Figura 35 Caudal experimental y calculado en tuberías principales	62
Figura 36 Velocidad experimental y calculada tuberías principales.....	63
Figura 37 Velocidad experimental y calculada para colas de tuberías	64
Figura 38 Presión calculada y experimental.....	64

Capítulo I: Introducción

1.1. Generalidades

En las edificaciones en el Perú, se emplea tradicionalmente el sistema por gravedad para drenar el agua de lluvia; lo que significa que, hay que dotar de una leve inclinación a las cubiertas y a los tubos colectores para que pueda entrar en funcionamiento y que permita la evacuación de las aguas pluviales.

El uso del sifón como elemento que ayude a la evacuación de aguas pluviales es una de las soluciones al drenaje en general, y así, han sido utilizados desde hace mucho tiempo, como facilitadores de transporte de aguas de una altura a otra. En la agricultura se ha utilizado para inundación de terrenos de cultivo y se hace uso de estos elementos en nuestra vida diaria, por ejemplo, en los desagües de casas, apartamentos, industrias, etc.

El sistema sifónico que nos ocupa en la presente investigación supone un gran avance tecnológico, y es que, a diferencia del método tradicional de drenaje por gravedad, el drenaje sifónico trabaja mediante succión, debido a la ausencia de aire en la tubería haciendo más eficiente y rápido el drenaje, y logrando así que, las tuberías trabajen al 100% de su capacidad.

En la evacuación de agua de lluvia acumulada en las cubiertas, el sistema sifónico facilita la construcción, debido a sus siguientes características: permite reducir el número de sumideros, la inexistencia de aire permite la utilización de tuberías de un diámetro más pequeño, la reducción considerable el número de bajantes y, lo más importante, que los colectores de descarga no necesitan tener pendiente y estas pueden ser horizontales, lo que se traduce en un ahorro de espacio evitando interferencias con otras instalaciones.

1.2. Antecedentes investigativos

1.2.1. Antecedentes nacionales

Santillán (2023) en la tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental : Evaluación de la eficiencia de un sifón invertido con bomba de ariete hidráulico para la conducción de agua, de la Universidad Toribio Rodrigues de Mendoza de Amazonas – Chachapoyas – Perú; describe en la sección de discusión “De acuerdo a las evaluaciones de sistema sifón, con tubería de una pulgada y 16 metros de longitud de manguera se puede extraer 15,92 l/min, lo cual, cuyo resultado se aproxima a lo encontrado por Hughes, Beard, y Platten (2021), que logro extraer 16.8 l/min. En ese contexto, el sistema el sifón que permite transportar agua sin uso de electricidad y significa la disminución de los costos en la operación de sistema respecto a otros sistemas comerciales” (p.23)

1.2.2. Antecedentes Internacionales

Zubieta (2013), en el trabajo de grado como requisito para optar por el título de Ingeniero Civil: Diseño de sifón hidráulico para un sistema piloto de humedales híbridos como post tratamiento de aguas residuales de una porcícola, de la Universidad Libre Seccional Pereira de Bogotá, Colombia, tuvo como objetivo “Diseñar un sifón hidráulico automático para un sistema piloto de humedales híbridos como post tratamiento de aguas residuales de una porcícola” (p.21), el cual entre sus conclusiones prescribe “La investigación permitió realizar el sifón hidráulico automático para el sistema piloto de humedales híbridos como post - tratamiento de aguas residuales de una porcícola” (p.63)

Arroyo (2016), en el trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil: Estudio del comportamiento hidráulico de un sistema de drenaje pluvial en cubiertas y áreas privadas de edificaciones, de la Universidad de Cartagena, Cartagena de Indias, Bolívar, Colombia, tuvo como objetivo “Analizar el comportamiento hidráulico en un

sistema de drenaje pluvial en cubiertas y áreas privadas de edificaciones en Colombia, específicamente en la ciudad de Cartagena, para el posterior transporte y disposición de estas, en el sistema de alcantarillado de aguas lluvias o mixto, mediante la revisión de los métodos de diseño aceptados actualmente por la NTC 1500 (Norma Técnica Colombiana), el Código de Fontanería Colombiano y pruebas de laboratorio, con el fin de mejorar el funcionamiento de las estructuras del sistema de drenaje de las aguas lluvias tales como rejillas y tragantes que se usan actualmente en el mercado comercial” (p.6), en la cual concluyó : “Se comprobó que el refinamiento de los modelos si lleva a obtener mejores diseños de las instalaciones pluviales de los edificios, los aportes más importantes de este estudio fueron el método sistemático que se generó para diseñar el drenaje de las cubiertas y las fórmulas propuestas en dicho artículo” (p.44).

1.3. Planteamiento de la realidad problemática

El cambio climático se viene experimentado a nivel mundial, del cual, el Perú no es ajeno, y una de las posibles consecuencias del citado fenómeno natural son las fuertes lluvias que experimentaría el Perú en sus diferentes regiones, las que, harían colapsar los sistemas de drenaje; particularmente la ciudad de Lima se vería seriamente afectado, dado que, la mayoría de las viviendas tienen techos planos y continúan diseñándose las viviendas con ese tipo de cobertura, lo que agrava el problema, puesto que, estos techos acumularían un considerable volumen de agua que podría colapsar si no cuenta con un buen sistema de drenaje.

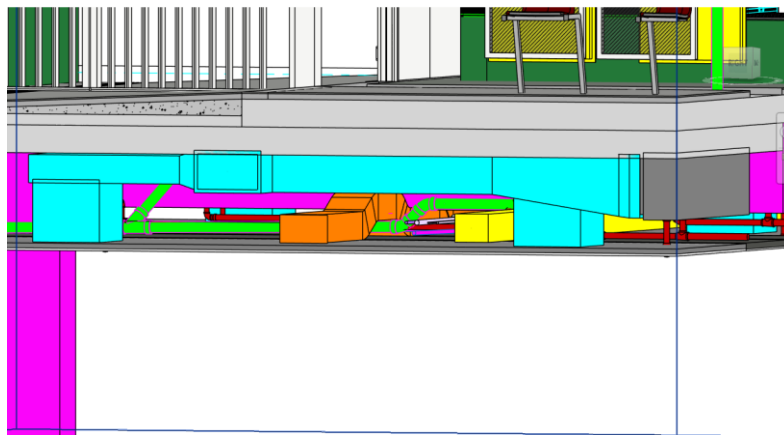
Este problema se agrava considerándose que en el Perú los últimos años se han suscitado eventos conocidos como “El fenómeno de El Niño costero”, el cual, está asociado a lluvias muy fuertes.

En la evacuación de aguas pluviales convencionales, las tuberías necesitan una determinada pendiente para que el agua discurra por gravedad, haciéndolas funcionar

como una alcantarilla; esto implica disponer de espacios verticales, los cuales, dificultan el diseño arquitectónico de las edificaciones. En la figura 1 se puede apreciar la tubería de drenaje pluvial (color verde) evitando tuberías de agua contra incendio (color rojo) y ductos de HVAC (color naranja, amarillo y celeste). Todo ese recorrido tendrá que estar dentro del falso cielo raso, el cual, en ocasiones es complicado por la pendiente que lleva la tubería.

Figura 1

Instalaciones en FCR



De lo anteriormente mencionado, se le añade que actualmente existen pocas normas o son poco claras acerca del diseño del drenaje pluvial en edificaciones, enfocándose mayormente en el drenaje urbano.

La eficiencia de estos sistemas de drenaje sifónicos va a depender del funcionamiento a tubo lleno de la tubería de drenaje, lo que significa, que debe generarse las condiciones adecuadas para formar el cebado de la tubería que garantizará una presión que haría funcionar la tubería de drenaje a tubo lleno.

Ahora bien, lo que se necesita es determinar cuál sería el caudal óptimo que asegure el funcionamiento a tubo lleno en un sistema de drenaje sifónico.

1.4. Formulación del problema

¿Cuál es el caudal óptimo que asegure el funcionamiento a tubo lleno en un sistema de drenaje sifónico cuando este solo varía su diámetro?

2.1. Objetivo principal

- Determinar el caudal óptimo que asegure un buen funcionamiento a tubo lleno en un sistema de drenaje sifónico, en la que solamente varía el diámetro de la bajante, y se mantiene las longitudes de las tuberías verticales y horizontales constantes.

2.2. Objetivos secundarios

- Observar y analizar el comportamiento hidráulico del sistema de drenaje sifónico.
- Observar y analizar la variación de presión cuando el sistema esta cebado y cuando existe una mezcla de agua y aire.
- Elaborar y dar herramientas de cálculo para la obtención eficaz del caudal optimo en un sistema de drenaje sifónico.

2.3. Hipótesis

El caudal óptimo, en diferentes diámetros de tuberías, es el que asegura el funcionamiento a tubo lleno en un sistema de drenaje sifónico en donde la cantidad de aire dentro del sistema es mínima.

2.4. Variables

2.4.1. Variables dependientes

- Caudal

2.4.2. Variables independientes

- Altura Vertical
- Distancia horizontal
- Presión
- Diámetro

Capítulo II: Marco Teórico

3.1. Sistema de drenaje

El principal propósito de un sistema de drenaje es evacuar las aguas desde un punto elevado hacia un sistema de recolección (ejemplo: red de drenaje, tanque de almacenamiento, canaletas) que usualmente se encuentra muy por debajo de donde se quiere evacuar.

3.2. Elementos de un sistema de drenaje

Según (Arroyo Quintero & Garcia Diaz, 2016) para este propósito se usan un conjunto de elementos de los cuales se puede mencionar los siguientes:

3.2.1. Elementos receptores

Son los elementos encargados de recibir el agua que se quiere drenar, se pueden mencionar los sumideros, de los cuales, se pueden encontrar de diferentes tipos, de acuerdo, a las necesidades del proyecto.

Figura 2

Tipo de sumideros para drenaje



Nota: fuente: rejillascrisol.com

3.2.2. Elementos verticales

Son las tuberías encargadas de transportar el agua de un nivel a otro hasta llegar al nivel de descarga. Entre estos elementos podemos mencionar a las montantes y tuberías verticales que unen a los sumideros.

3.2.3. Elementos horizontales

Son las tuberías que transportan el drenaje hacia un elemento vertical o hacia su descarga final. Estas tuberías tendrán o no pendiente dependiendo del tipo de sistema que se use, los cuales, se detallarán más adelante en la presente investigación.

3.3. Tipos de sistema de drenaje

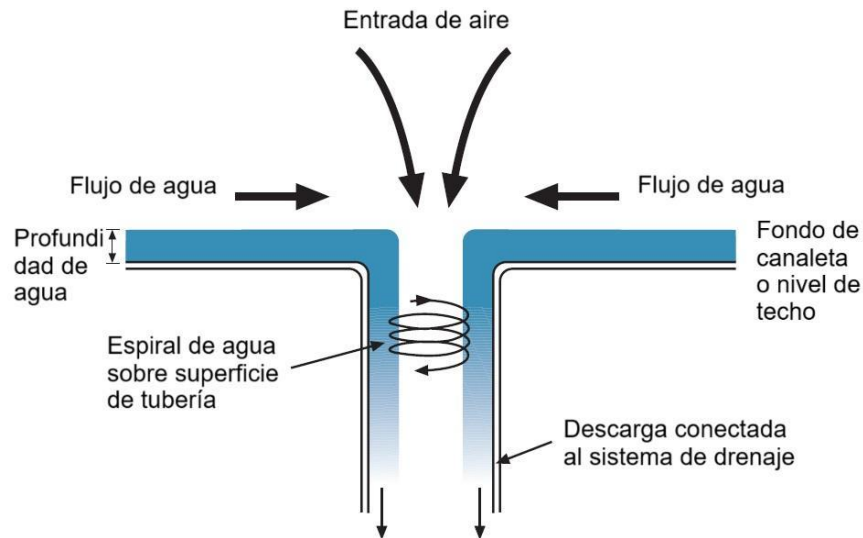
3.3.1. Drenaje convencional

Los sistemas convencionales están diseñados para trabajar con la presión de la atmósfera. Estas redes de tuberías trabajan con 1/4 a 1/3 de la tubería llena (May 1997; Sommerhein 1999). Debido a que, estos sistemas transportan aire (trabajan a un flujo anular), el diámetro requerido para transportar la combinación de aire y agua al mismo tiempo es de mayor dimensión.

Los sumideros, aunque en el mercado hay de diferentes formas, su funcionamiento se resume a un orificio, en el cual, el agua cae a caída libre. Los elementos adicionales que tengan los sumideros son para prevenir que los sólidos ingresen al sistema.

Figura 3

Esquema de sumidero en sistema de drenaje convencional



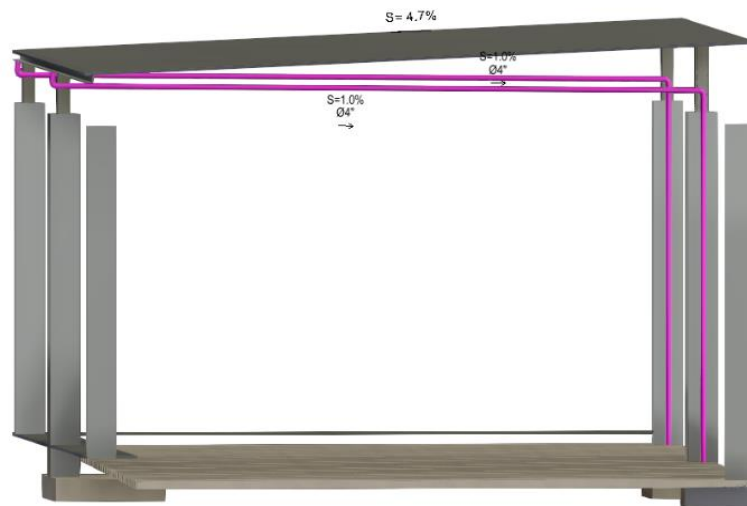
Nota: fuente: Modificado de Fullflow

Debido a que trabajan a presión atmosférica, deben tener cierta pendiente a lo largo de los elementos horizontales para transportar el agua, este es una de sus desventajas al momento de instalar tuberías en largos recorridos.

Según (R.M.P May, 1997) la carga disponible en el sumidero de este sistema convencional viene a estar dada por el nivel de agua sobre el nivel del sumidero, entonces, en canaletas se tiene en promedio una altura de 10cm de agua con respecto del sumidero y, en caso de techos planos, esta altura se reduce a 3 cm.

Figura 4

Ejemplo de Drenaje Convencional



3.3.2. Drenaje sifónico

Los sistemas de drenaje sifónico son un tipo de tecnología más compleja que los drenajes convencionales. En este tipo de sistemas, el objetivo es inducir presiones negativas en el interior del sistema con el fin de cebar las tuberías. Para su máxima eficiencia se debe remover la máxima cantidad de aire posible que ingresa por el sumidero.

La forma de cebar el sistema varía dependiendo del tipo de sumidero que se utilice, de los cuales, podemos mencionar dos: sumidero de sifón tipo campana y sumidero con plato antivortex, este último, será el sumidero usado en la presente investigación.

3.4. Tipos de sumideros sifónicos

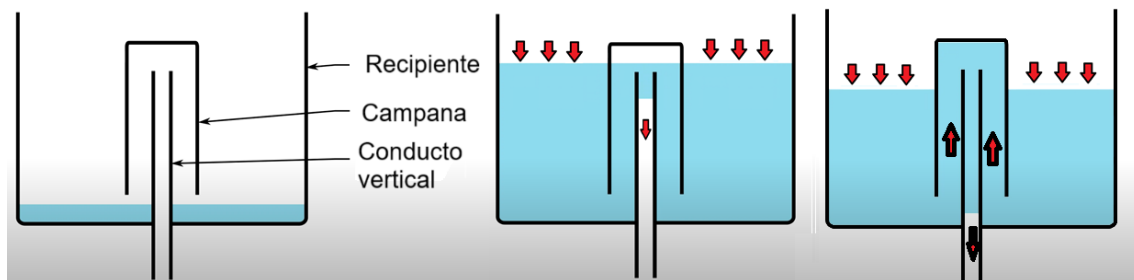
3.4.1. Sumidero de sifón tipo campana

Este tipo de sumidero es mayormente usado en la agricultura, su construcción se basa en una campana, en la cual, dentro se le coloca un conducto vertical, conectada a la red de drenaje de determinada altura, la cual, deja un espacio libre en la parte superior de la campana.

Cuando el nivel de agua supera la altura del conducto vertical, la cámara de aire se llena de agua dentro de la campana y el aire es desplazado hacia la red de drenaje.

Figura 5

Funcionamiento de sifón tipo campana



Nota: fuente modificada Practical Engineering¹

Estos tipos de sumideros no son muy usados en proyectos de drenaje de coberturas de edificaciones debido al tirante de agua que conlleva llenar la campana, lo que se traduce en canaletas más altas cuando estas recogen el agua de coberturas inclinadas. En caso de techos planos no es muy recomendable el uso de estos tipos de sumideros

¹ Imágenes extraídas del video "Sifón campana automático explicado"
https://www.youtube.com/watch?v=_vV_z_0lFQ8

3.4.2. Sumidero con plato antivortex

Este tipo de sumidero se estudiará en la presente investigación. Su funcionamiento se basa en impedir que el aire ingrese en el sistema de drenaje, lo cual, se logra con un plato encima del orificio por donde drena el agua.

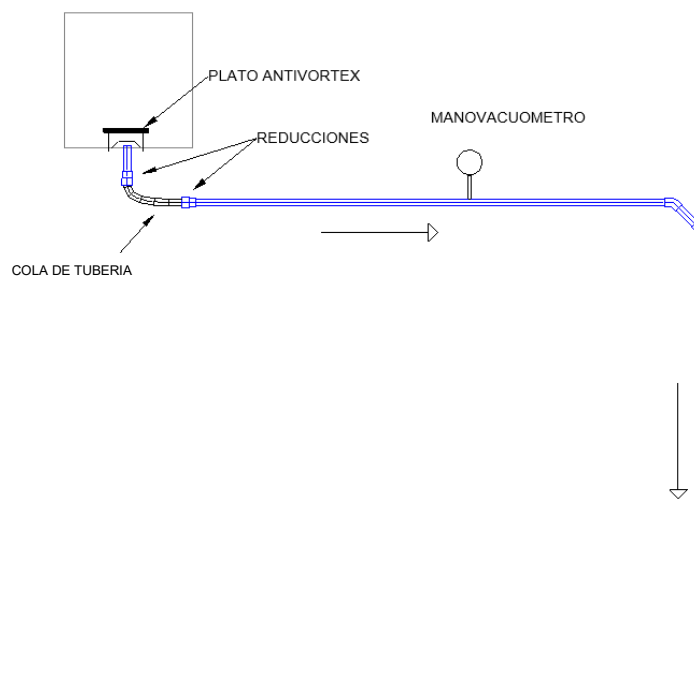
Estos sistemas, con este tipo de sumidero, no trabajan de manera sifónica en el estricto significado de la palabra. Su forma de reducir la presión dentro del sistema se debe a las altas velocidades que se alcanzan².

Con el fin de poder describir los modos de operación del sistema las dividiremos en las siguientes:

- Flujo tipo canal: Es el flujo en el que un drenaje convencional trabaja.
- Flujo aireado: Es el flujo de agua combinado con aire.
- Flujo lleno o tubo lleno: Flujo donde la tubería está completamente lleno de agua.

Figura 6

Esquema de Drenaje Sifónico



² (R.M.P May, 1997)

3.5. Cebado en cola de tubería

Según (Arthur, 1998) la tubería que conecta el sumidero con la tubería principal se llama cola de tubería ³ (Ver Ilustración 5). Este es muy importante para lograr el cebado del sistema en términos de altura de agua dentro del recipiente, esto quiere decir, que la cola de tubería ayuda a que el sistema ceba más rápido, y por lo tanto. el agua dentro del recipiente no tenga un mayor tirante. El autor también recomienda que el diámetro de la tubería que conecta a la cola de tubería no debe ser mayor de 10-20% y que sean, en el mejor de los casos, curvas para tener una pérdida de carga que desarrolle saltos hidráulicos, necesarios para lograr el flujo a tubo lleno.

Sin embargo (PhilipRains, 2008) menciona que el uso de esta cola de tubería es discutido y menciona “Las pruebas han indicado que, si solo una tubería vertical es conectada desde el sumidero sifónico hacia la zona de descarga, la resistencia hidráulica sería insuficiente para permitir el flujo a tubo lleno”. Aunque recalca que, si bien no es esencial para lograr el cebado, esta cola de tubería ayuda a lograr el cebado más rápido en el sistema.

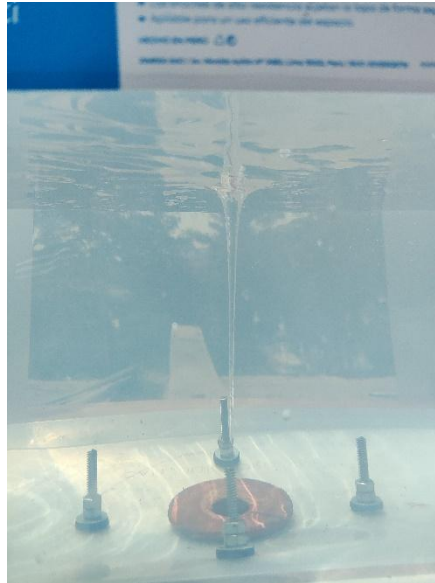
3.6. Sumergencia crítica

La sumergencia crítica es la altura de agua dentro de un recipiente, en el cual, un vórtice de agua tiende a aparecer. Estos vórtices son la principal causa del ingreso de aire al sistema, por lo que, es algo que se debe evitar en los drenajes sifónicos

³ Traducido del inglés “tailpipe” (Arthur, The Priming Focussed Design of Siphonic Roof Drainage, 1998)

Figura 7

Formación de vórtice en sumidero sin plato antivortex



Para evitar la formación del vórtice se coloca un plato encima del sumidero, eso no significa que este plato asegure la no formación de ningún vórtice, más adelante se mencionara sobre la aparición de un vórtice aun con el plato antivortex, el cual, a los segundos de aparecer se desvanecen.

3.7. Plato antivortex

Este elemento es importante para evitar el ingreso de aire al sistema. Se coloca en la posición del sumidero (Ver Ilustración 2.6). La altura y el diámetro afectan ligeramente la altura de agua del recipiente lo cual afecta a la altura del cebado. Según (PhilipRains, 2008) las alturas de agua varían según el siguiente:

- Altura del plato con $Q=10$ l/s y Sumidero de 56mm

Tabla 1

Rango de altura del plato vs altura de agua

Altura del plato (mm)	Altura de agua (mm)
10	36

20	38
30	41

- Diámetro del plato con $Q=10$ l/s y altura del plano 30mm

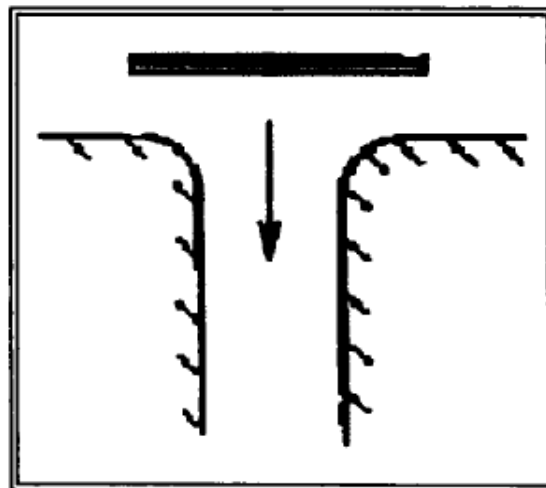
Tabla 2

Rango de diámetro del plato vs altura de agua

Diámetro del plato (mm)	Altura de agua (mm)
56 (1D)	52
112 (2D)	47
168 (3D)	41
224 (4D)	34

Figura 8

Posición del plato



Fuente: (PhilipRains, 2008)

3.8. Cebado

El cebado es el proceso, por el cual, a través de saltos hidráulicos, la tubería pasa desde el flujo de canal hasta el flujo a tubo lleno.

Una característica física que se puede apreciar en los sistemas cebados es la transparencia del agua, un flujo agua que tiene una opacidad blanca es significado de que esta posee gran cantidad de aire y el sistema, aunque esté trabajando a presión negativa no está trabajando a su caudal óptimo. Según (Lucke & Beecham, 2014) “Aunque los sistemas sifónicos están diseñados para operar a tubo lleno, estos también pueden funcionar parcialmente llenos”.

Figura 9

Cebado tubería parcial (izquierdo) y total (derecho)



3.9. Cavitación

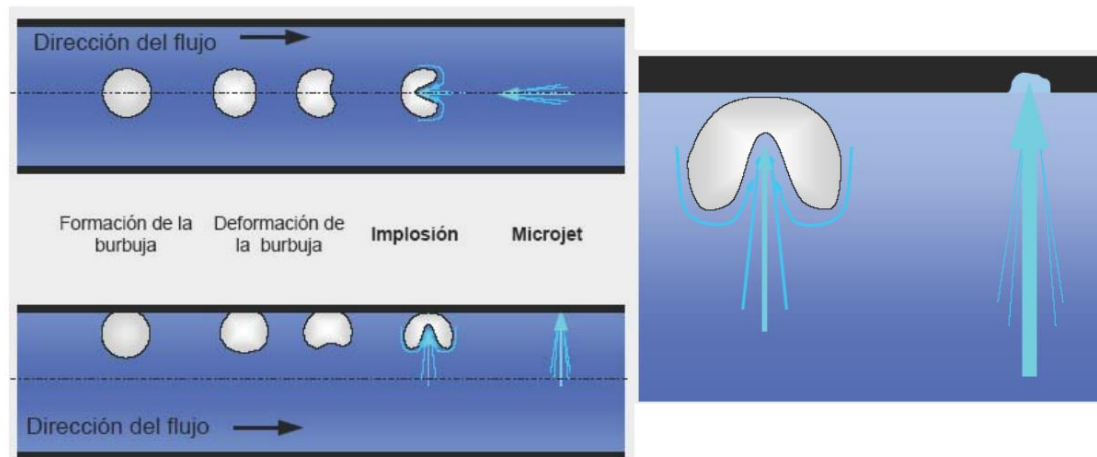
La cavitación es la formación de bolsas de vapor del fluido cuando su presión absoluta de este es menor a su presión de vapor. Cuando el fluido pasa de un punto de mayor presión a una depresión menor a la presión de vapor, el agua pasa a estado de vapor formando unas bolsas que reducen el área de flujo lo cual disminuye aún más la presión⁴, estas bolsas luego tienden a ir a las zonas de mayor presión las cuales se

⁴ (Marchegiani, 2006)

encuentran en las paredes de las tuberías y al estar en mayor presión estas bolsas de agua ceden e implotan dañando las paredes de conducto.

Figura 10

Colapso de una bolsa de aire



Nota: fuente (Marchegiani, 2006)

En sistemas de drenaje sifónico el control de la cavitación juega un papel muy importante debido a que estos sistemas trabajan con una presión debajo de la presión atmosférica, además, de que las velocidades también son mayores que en un sistema convencional.

3.10. Cálculo hidráulico en sistemas de drenaje sifónico

El cálculo hidráulico para los sistemas de drenaje sifónico será a través del análisis de la ecuación de conservación de la energía de Bernoulli.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \quad (1)$$

Donde:

P = Presión del fluido en el punto considerado

ρ = Densidad del fluido

V = Velocidad

Z =Altura del punto considerado

g =Gravedad

Esta ecuación expresa que la energía en cualquier punto del sistema es siempre una constante. Esta igualdad es posible cuando los fluidos tienen las siguientes características:

- El fluido no debe tener resistencia a fluir, es decir, su viscosidad es igual a 0.
- El fluido debe ser incompresible.
- No debe existir variación de calor.

Respecto a la primera característica, se aprecia que, el fluido a estudiar (agua) tiene viscosidad, por lo que, existe una pérdida de energía que desiguala la ecuación. Esto es, porque la ecuación de Bernoulli representa el principio de conservación de la energía, lo que, en un fluido existe rozamiento de este con la tubería y accesorios.

Para hallar esta pérdida de energía, debido a la pérdida de carga en tuberías, se usará la ecuación de Darcy-Weisbach que es la siguiente:

$$h_f = f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad (2)$$

Para las pérdidas de carga de accesorios se usará la siguiente ecuación:

$$h_t = K_i \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad (3)$$

Donde:

h_f =pérdida de carga en tubería (mca)

h_t =pérdida de carga local (mca)

K_i =factor dada por el fabricante (adimensional)

f =factor de fricción de Darcy-Weisbach (adimensional)

L =Longitud (m)

V =Velocidad (m/s)

g = Gravedad

El factor de fricción f se calculará usando la ecuación de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2.51}{Re \sqrt{f}} + \frac{\varepsilon}{3.71D} \right) \quad (4)$$

Donde:

f = factor de fricción de Darcy-Weisbach (adimensional)

D = Diámetro(m)

ε = Rugosidad de tubería(m)

Re = Numero de Reynolds (adimensional)

De la anterior ecuación es necesario hallar el número de Reynolds, el cual, se calculará de la siguiente forma:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (5)$$

Donde:

Re = Numero de Reynolds (adimensional)

D = Diámetro(m)

V = Velocidad media del fluido (m/s)

ν = Viscosidad cinemática del fluido (adimensional)

La ecuación de Colebrook-White es válida para flujos turbulentos ($2000 < Re < 4000$). Si el flujo es menor a esos valores el factor de fricción se simplifica a $f = 64/Re$. Sin embargo, los flujos de los sistemas de drenaje sifónicos siempre son turbulentos, por lo que, la fórmula de Colebrook-White se mantiene como se lo ha propuesto⁵.

También se puede apreciar que el factor de fricción f se encuentra en ambos lados de la ecuación, por lo que, se procederá a usar una rutina de iteración para hallar su valor.

⁵ (American Society of Plumbing Engineers, 2018)

Con las ecuaciones propuestas podemos considerar las pérdidas de cargas en la ecuación 3.1 de la siguiente forma:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \Sigma h_f + \Sigma h_k \quad (6)$$

Donde:

Σh_f = Sumatoria de pérdida de carga en tubería del trayecto 1-2 (mca)

Σh_k = Sumatoria de pérdida de carga local del trayecto 1-2 (mca)

De la ecuación 3.6 se puede simplificar a una más simple cuando analizamos el punto del sumidero (Punto 1) y el punto de descarga (Punto 2)

- En el sumidero y la descarga, al estar en contacto con la atmósfera se puede afirmar que $P_1 = P_2 = 0$
- En el recipiente la velocidad en V_1 es mucho menor que V_2 por lo que puede ser considerado despreciable

La ecuación simplificada quedaría de la siguiente forma:

$$Z_1 - Z_2 = \frac{V_2^2}{2g} + \Sigma h_f + \Sigma h_k \quad (7)$$

Marco legal

4.1. Normativa nacional

A la presente fecha de esta investigación no existe una norma que regule los sistemas de drenaje sifónico por lo que se tomará como referencia las normas y reglamentos que hacen referencia sobre el drenaje convencional.

Se ha usado como referencia las siguientes normas

- CE.040 del Reglamento Nacional de Edificaciones “DRENAJE PLUVIAL”

- Norma Técnica de Salud (NTS) 110 “INFRAESTRUCTURA Y EQUIPAMIENTO DE LOS ESTABLECIMIENTOS DE SALUD DEL SEGUNDO NIVEL DE ATENCIÓN”

Se tomará como referencia para esta investigación los siguientes cuadros encontrados en la NTS 110

Tabla 3

Montantes de agua de lluvia

Montantes de agua de lluvia (m² Área Servida) para intensidades de lluvia en mm/h

Diámetro de la Montante	Intensidad de lluvias (mm/h)					
	50 m ²	75 m ²	100 m ²	125 m ²	150 m ²	200 m ²
	Metros cuadrados de área servida (proyección horizontal)					
2	130	85	65	50	40	30
2-1/2"	240	160	120	95	80	60
3	400	270	200	160	135	100
4	850	570	425	340	285	210
5			800	640	535	400
6					835	625

Nota: fuente Norma Técnica de Salud N°113

Tabla 4

Conductos horizontales para agua de lluvia

Conductos horizontales para aguas de lluvia

Diámetro del Conducto	Intensidad de Lluvias (Mm/H) Pendiente 1%					Intensidad de Lluvias (Mm/H) Pendiente 2%				
	50	75	100	125	150	50	75	100	125	150
	Metros cuadrados de área servida (proyección horizontal)									
3"	150	100	75	60	50	215	140	105	85	70
4"	345	230	170	135	115	490	325	245	195	160
5"	620	410	310	245	205	875	580	435	350	290
6"	990	660	495	395	330	1400	935	700	560	465
8"	2100	1425	1065	855	705	3025	2015	1510	1210	1005

Nota: fuente Norma Técnica de Salud N°113

4.2. Normativa internacional

Se ha tomado en consideración las siguientes normas internacionales

- ASPE/ANSI 45-2018 Siphonic Roof Drainage
- BS 8490:2007 Guide to drainage roof drainage systems

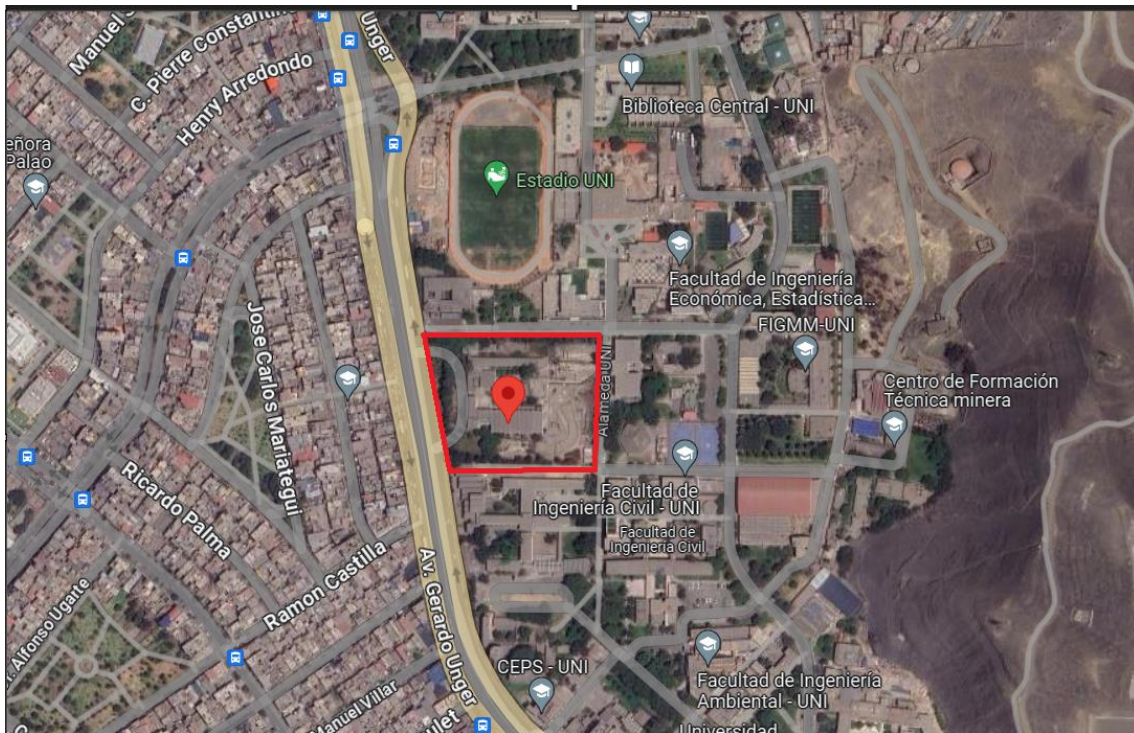
Capítulo III: Metodología

Para la presente investigación se usará la metodología experimental. El experimento se desarrollará en el Laboratorio Nacional de Hidráulica, el cual se ubica dentro de la Universidad Nacional de Ingeniería.

5.1. Ubicación

Figura 11

Ubicación del Laboratorio Nacional De Hidráulica



Coordenadas: -12.020239447378126, -77.05017221780864

Altura: 106 msnm

El lugar de experimentación es una zona abierta y junto a ella se encuentra el edificio del correntómetro del Laboratorio Nacional de Hidráulica. Este edificio cuenta con una altura, desde el jardín hasta el techo, de 6 metros.

5.2. Distribución y elementos del experimento

En el primer nivel se colocará la piscina que servirá de reservorio y el sistema de bombeo.

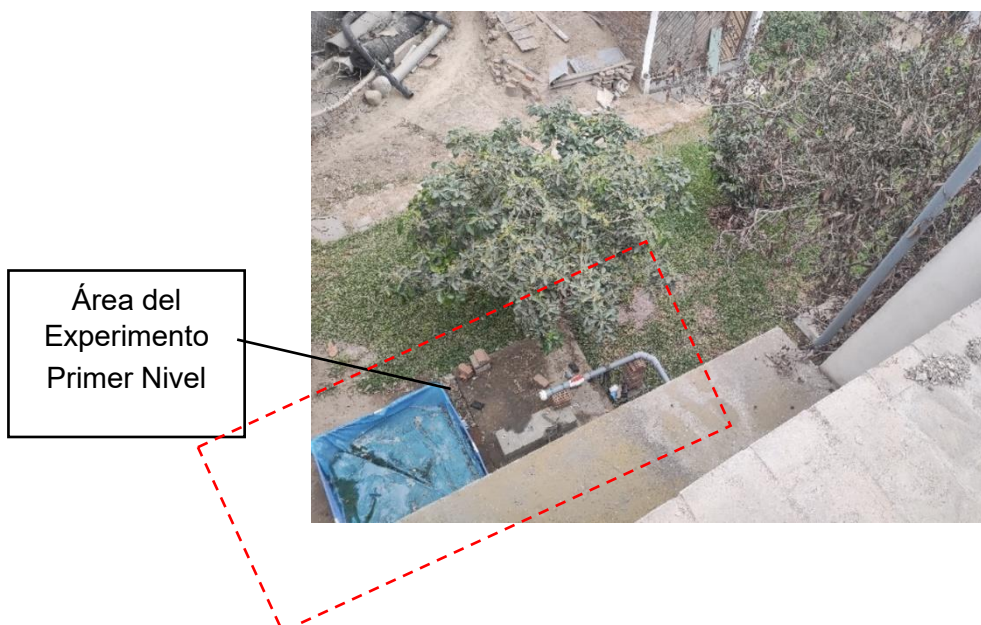
Figura 12

Área del experimento



Figura 13

Vista desde arriba



En nivel superior ira lo correspondiente a los recipientes y los sumideros de diferentes diámetros, así como el mano vacuómetro para medir la presión. La configuración del sistema se detalla en el siguiente esquema:

Figura 14

Diagrama del experimento

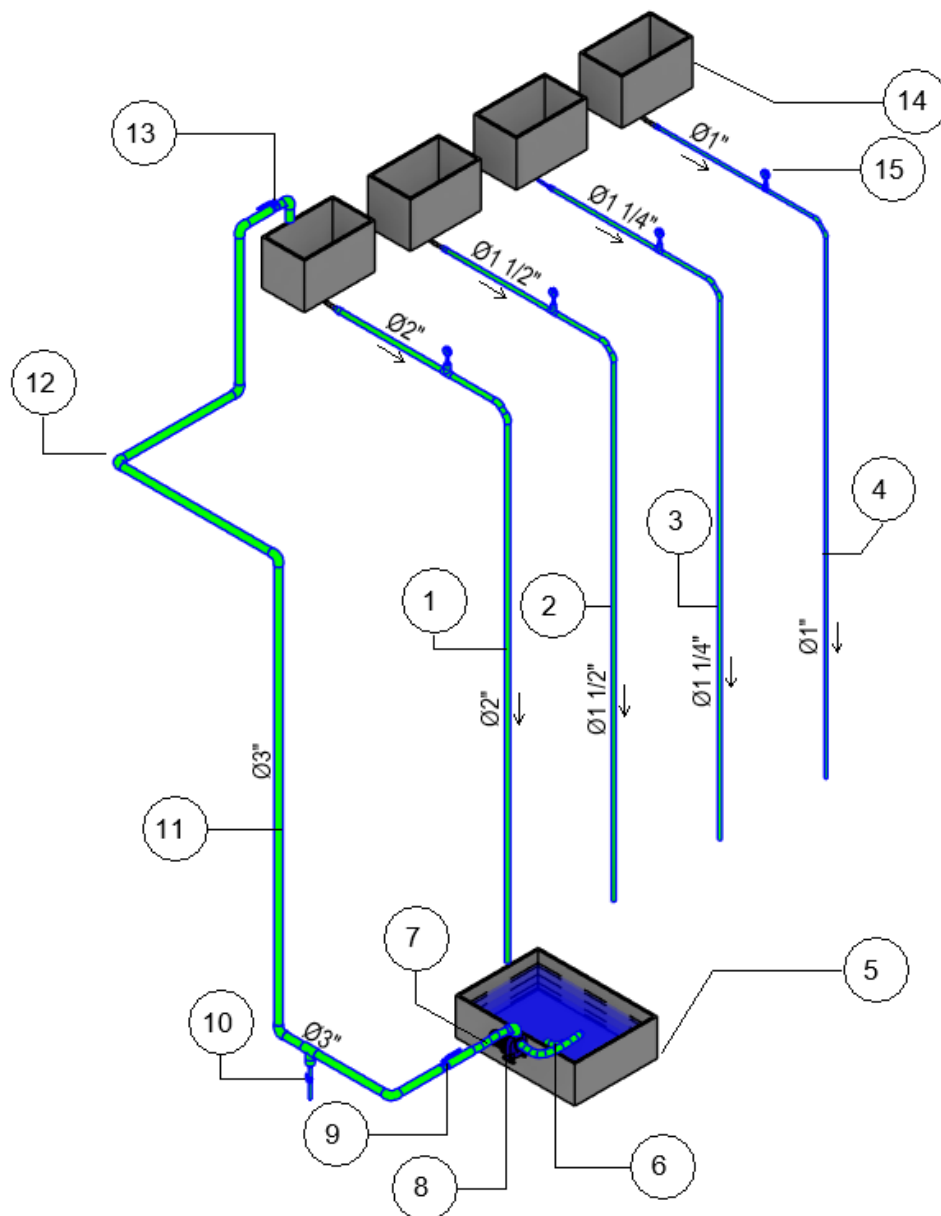


Tabla 5

Lista de Items

N°	ITEM
1	Tubería PVC CL 10 Ø2"
2	Tubería PVC CL 10 Ø1½"
3	Tubería PVC CL 10 Ø1¼"
4	Tubería PVC CL 10 Ø1"
5	Piscina 1500L
6	Tubería Corrugada HDPE Ø3"
7	Manga de impulsión Ø3"
8	Motobomba 6.5 HP
9	Válvula esférica Ø3"
10	Válvula de esférica Purga Ø3"
11	Tubería CL 10 Ø3" – Impulsión
12	Codo 90° PVC
13	Válvula esférica Ø3"
14	Recipiente de 60 L
15	Mano vacuómetro

5.3. Almacenamiento de agua

Para el almacenamiento de agua se ha utilizado una piscina portátil de medidas 228x159x42cm de la marca Bestway que tiene una capacidad de 1500 L

Figura 15

Piscina portátil



Debido a que el lugar del experimento se encontraba en una zona abierta y las pruebas se realizaron en diferentes días, dentro de la piscina se formaban algas.

Debido a esto al finalizar el día se agregaba cloro y sulfato de cobre, con esto se pudo mejorar la calidad de agua para su mejor visualización

5.4. Sistema de bombeo

Para alimentar a los recipientes se usará una motobomba de las siguientes características:

Tabla 6

Características de la Motobomba

Marca	Werken WB30
Potencia	3.8kW
Caudal	53m ³ /h
Altura	25m
Combustible	Gasolina
Succión	3"
Impulsión	3"

Figura 16

Motobomba Werken



5.5. Línea de succión

Se uso una tubería corrugada de diámetro de 3" conectada a una canastilla para evitar el ingreso de solidos de gran tamaño que pudieran dañar la bomba. No fue necesario usar una válvula check de tipo pie debido a que la misma bomba posee un antirretorno incorporado

5.6. Línea de impulsión

Para la línea de impulsión se usó tubería de PVC C10. En su línea se ha instalado tres válvulas, 2 válvulas esféricas de Ø3" y una válvula de Ø1" la cual servirá de purga para línea de impulsión

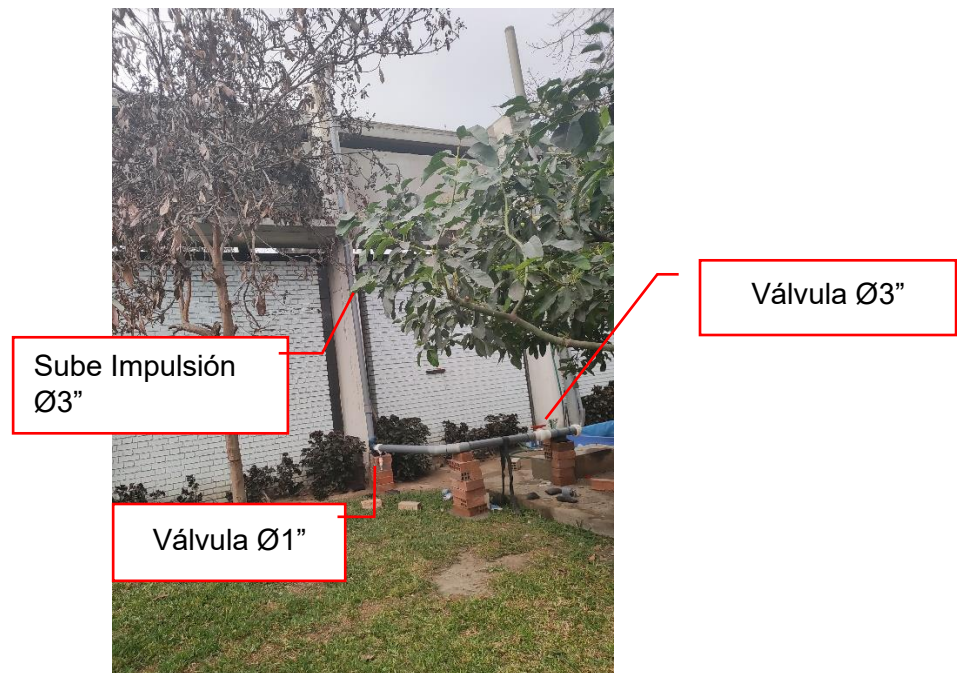
Figura 17

Línea de impulsión - Nivel Superior



Figura 18

Línea de impulsión - Nivel Inferior



5.7. Recipiente y sumidero

El recipiente que se ha usado para el presente experimento será un recipiente de polipropileno de 68 litros de siguientes dimensiones:

Altura: 34.70cm

Ancho: 46.40cm

Largo: 59.70cm

Figura 19

Recipiente de Polipropileno 68L

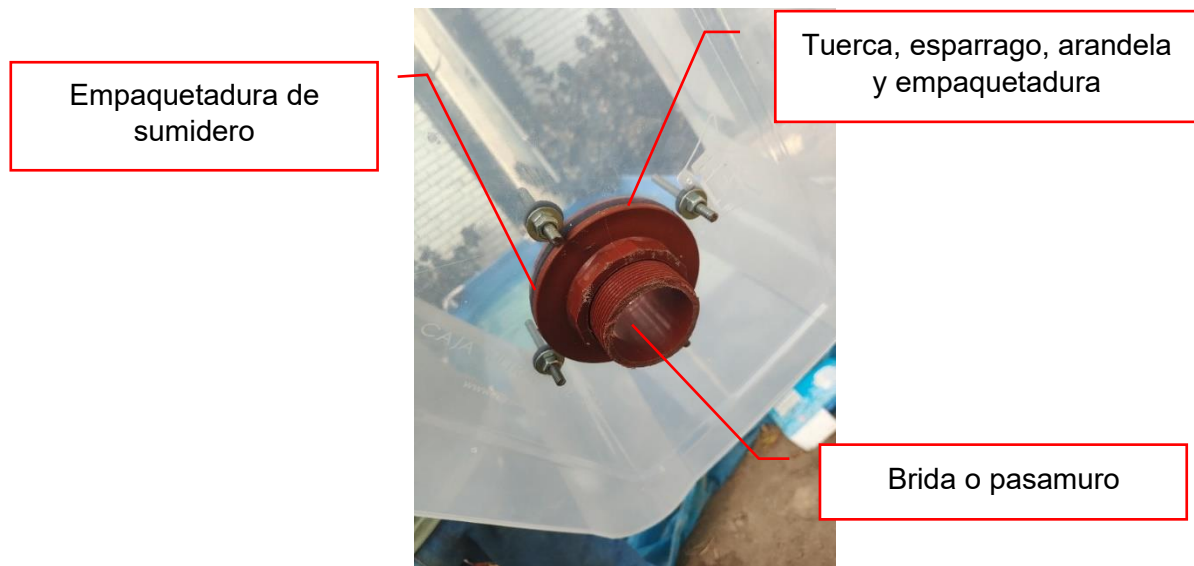


En el recipiente se hará 4 perforaciones donde se colocarán espárragos de Ø1/4" de fierro sujetadas con tuercas y arandelas que serán los soportes para el plato antivortex. Para evitar las posibles fugas por esas perforaciones se colocó empaquetaduras de jebe en cada una de las perforaciones.

Para el sumidero se usó una brida o pasamuros, el cual posee su empaquetadura para evitar las fugas.

Figura 20

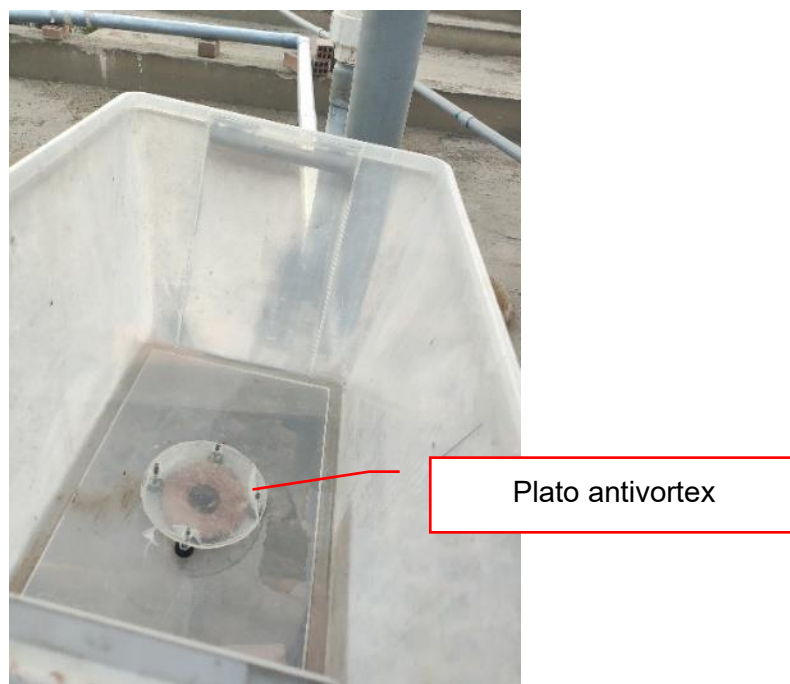
Instalación de sumidero en recipiente



Para el plato antivortex se utilizó una plancha de acrílico de 4mm de grosor, la cual, se cortó de manera circular. Posteriormente se procedió a perforar 4 agujeros donde se instalarán en los esparragos mencionados anteriormente.

Figura 21

Posición del plato antivortex



5.8. Bajante

Es la línea que conduce el agua desde el recipiente hacia la piscina para así lograr un proceso de recirculación para el experimento. En esta línea también se colocará un manómetro para medir la presión durante el experimento.

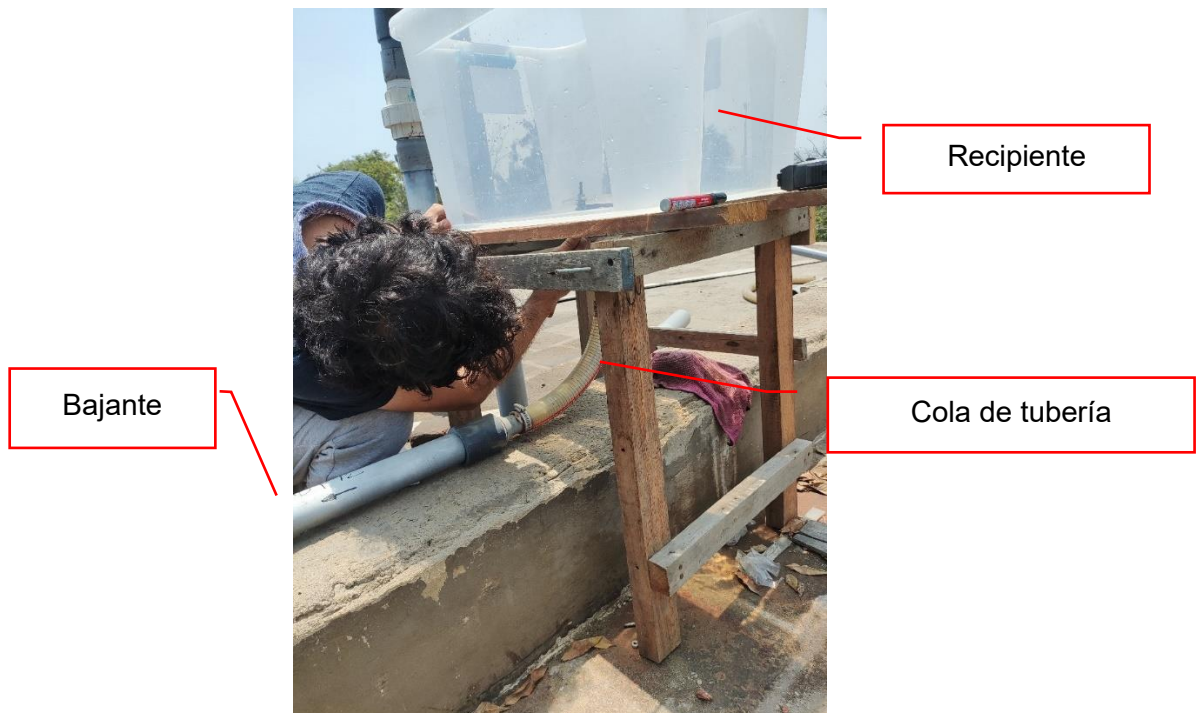
Al inicio del sumidero se colocada una reducción con el fin de ayudar al cebado de la tubería (a lo que se le denominara cola de tubería). Para mejorar la visualización del flujo se ha colocado una tubería flexible transparente.

La tubería horizontal tendrá una distancia de 2.5 metros mientras que la vertical tendrá una altura de 5.5 metros.

Para la unión entre tubería rígida y la flexible se usó reducciones concéntricas de acuerdo con los accesorios que se encontraban en el mercado. Adicionalmente en la intersección entre la tubería horizontal y la vertical se colocaron 2 codos de 45° con el fin de reducir la pérdida de carga.

Figura 22

Conexión de recipiente y bajante



5.9. Medición de presiones

Para el sistema de una bajante se ha utilizado dos manómetros de diferentes rangos, al inicio se utilizó un manóvacuometro de marca Nuova Fima de rango -30 psi/-1bar a 100psi/6.89bar.

Figura 23

Manovacuometro Nuova Fima



Debido a que este manovacuometro poseía un rango de medición muy alto era difícil su visualización por lo que se decidió usar uno de marca Pressy el cual tiene un rango de -30 psi/-1bar a 15bar/1.03psi

Figura 24

Manovacuometro Pressy



5.10. Puesta en marcha

Una vez llenado la piscina se hace la preparación del equipo de bombeo, cebando la bomba con la primera válvula esférica cerrada (Tabla 3.2 ítem 9). Seguidamente se prende la bomba, debido a que esta posee su antirretorno dentro del equipo la línea de succión inicialmente estará lleno de aire por lo que los primeros momentos no se lograra el bombeo de agua.

Se ha podido observar que teniendo inicialmente la primera válvula esférica cerrada y encendiendo la bomba para luego abrir y cerrar la válvula ayuda a eliminar más rápidamente el aire de la línea de succión. Esto es importante debido a que en agua no llegaba a subir incluso cuando la bomba estaba encendida durante varios minutos.

El caudal se controlará por medio de acelerador que posee la motobomba, así como también por la segunda válvula que se encuentra en la parte superior (Tabla 3.2 ítem 13) para mayor precisión.

Figura 25

Acelerador de motobomba



5.11. Medición de caudal en la bajante

Durante el experimento se observó el inconveniente de medir el caudal con la bomba encendida. Si bien le logró estabilizar el caudal de la bajante con el caudal que aportaba la bomba, este no era el óptimo debido a que el aire que ingresaba debido a la descarga libre disminuía la eficiencia del sistema.

Para mitigar este problema, también se optó por una descarga sumergida, sin embargo, las vibraciones de la bomba cerca de la línea de succión también aportaban considerable cantidad de burbujas de aire lo cual se traducía en que el efecto sifón del sistema de viera afectado negativamente.

Figura 26

Descarga libre en recipiente



Formación de burbujas de aire dentro de la masa de agua

Para poder lograr la medición del caudal se eligió un punto en el recipiente hasta donde se tenía que llenar, se procede a llenar todo el recipiente y se mide desde la línea de referencia el tiempo hasta que el recipiente se vació. Previamente a esto halló el volumen del recipiente hasta esa línea por medio de un flujómetro.

Figura 27

Medición de volumen con flujómetro



Figura 28

Línea de nivel en recipiente



Línea de referencia
para toma de
medición

Se sigue el siguiente procedimiento:

- a. Se procede a escoger e instalar un diámetro de una bajante.
- b. Se bombea agua de la piscina hacia el recipiente ubicado en la parte superior verificando el caudal a través del acelerador de la motobomba y afinándolo

a través de la válvula esférica ubicada en la parte superior del experimento (Tabla 3.2 ítem 13).

- c. Se llena el recipiente hasta un nivel predeterminado del recipiente y se apaga la bomba, primero desacelerando y después cortando su suministro de energía. Para detener el flujo remanente en la línea de impulsión se cierra la segunda válvula.

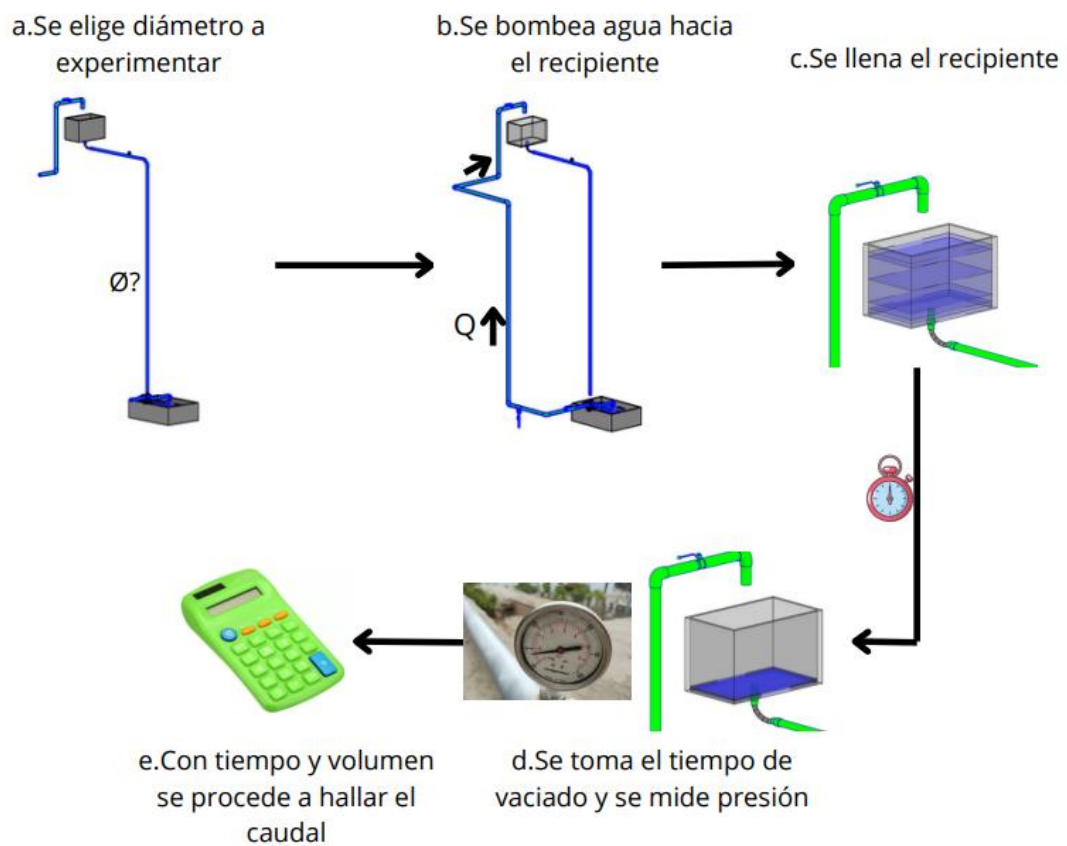
IMPORTANTE: La válvula esférica debe cerrarse de manera suave y controlada, ya que, cuando se produce un cierre brusco mientras la bomba está en funcionamiento, se genera un golpe de ariete. Este golpe de ariete provoca vibraciones significativas en la bomba, lo que puede resultar en daños graves a sus componentes internos y reducir su vida útil o incluso desplazar la línea de impulsión y hacerla colapsar si es que sus soportes no son lo demasiado fuertes. Por lo tanto, es crucial evitar cierres repentinos para proteger y mantener el buen estado del sistema.

- d. Una vez llenado se empieza a medir desde que el nivel de agua llega al nivel de referencia hasta que el recipiente se vacíe. Lo cual sucederá cuando se oiga un sonido de burbujeo en el sumidero, indicando así el fin de la prueba
- e. Con el tiempo medido y el volumen del recipiente conocido se halla el caudal.

De forma gráfica también se puede explicar los pasos anteriores en el siguiente diagrama.

Figura 29

Pasos para experimentación



5.12. Ensayos generales

Se hizo pruebas para cada diámetro con escenarios específicos antes de realizar la prueba de caudal óptimo para comprender mejor el comportamiento del sistema sifónico para cada diámetro. Primero se probó el manovacuometro desinstalado dejando así un orificio por el cual ingresaba en aire del exterior.

Figura 30

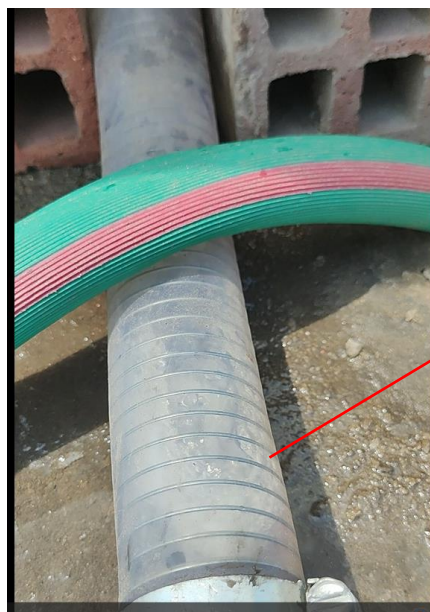
Bajante con manovacuumetro desinstalado



Se observo en la cola de tubería que el agua circulaba con alta cantidad de aire el agua disminuía con mucha lentitud esto debido a que la tubería estaba transportando una combinación de aire y agua. Sin embargo, cuando se tapa ese ingreso de aire se forma el sifón apreciándose un aumento en la velocidad del flujo y menor cantidad de aire.

Figura 31

Formación de burbujas en sistema



Burbujas de
aire dentro
del sistema

También se realizó una prueba sin el plato antivortex, en el cual el sifón si llego a formarse a su máxima capacidad sin embargo conforme bajaba el nivel del agua aparecían remolinos que disminuían la eficiencia del sistema.

Figura 32

Formación de sifón sin plato antivortex



5.13. Resultados

Se mide los tiempos para los 4 diámetros y se obtuvo lo siguiente resultados. Cabe mencionar la medición del mano vacuómetro por temas de visualización pueden variar ligeramente.

5.13.1. Escenario 1: D = Ø2"

Se bombeo y lleno el recipiente y se comenzó a medir el tiempo desde un punto de referencia mencionado anteriormente. No se presentaron complicaciones al presentarse la prueba más que para la medición de los tiempos, esto debido a que el caudal era tan alto y el margen del punto de referencia y el recipiente lleno era tan pequeño que se tuvieron que repetir las pruebas.

Prueba	ESCENARIO 1		
	Ø2"		
	t (seg)	P (Bar)	Q (l/s)
1	10.64	-0.4	5.639
2	10.17	-0.4	5.9
3	11.29	-0.4	5.314
4	11.66	-0.4	5.146
5	10.32	-0.4	5.814
6	11.37	-0.4	5.277
7	11.34	-0.4	5.291
8	10.7	-0.4	5.607
9	10.83	-0.4	5.54
10	11.39	-0.4	5.268
11	10.23	-0.4	5.865
12	10.12	-0.4	5.929
13	10.98	-0.4	5.464
14	9.44	-0.4	6.356
15	10.1	-0.4	5.941
16	9.77	-0.4	6.141
17	9.72	-0.4	6.173
18	9.29	-0.4	6.459
19	10.23	-0.4	5.865
20	11.25	-0.4	5.333

Tabla 7 Resultados prueba Ø2"



5.13.2. Escenario 2: D = Ø1½"

Se bombeo y lleno el recipiente y se comenzó a medir el tiempo desde un punto de referencia mencionado anteriormente. No se presentaron complicaciones al presentarse la prueba. El caudal era notoriamente menor por lo que la medición de tiempo era más fácil

	ESCENARIO 2		
	Ø1 ½"		
	t (seg)	P (Bar)	Q (l/s)
1	17.41	-0.4	3.446
2	16.19	-0.4	3.706
3	16.36	-0.4	3.667
4	16.07	-0.4	3.734
5	16.05	-0.4	3.738
6	16.51	-0.4	3.634
7	17.32	-0.4	3.464
8	16.4	-0.4	3.659
9	17.58	-0.4	3.413
10	15.66	-0.4	3.831
11	16.42	-0.4	3.654
12	16.04	-0.4	3.741
13	16.31	-0.4	3.679
14	17	-0.4	3.529
15	16.44	-0.4	3.65
16	15.47	-0.4	3.878
17	17.32	-0.4	3.464
18	16.34	-0.4	3.672
19	16.71	-0.4	3.591
20	16.89	-0.4	3.552



Tabla 8 Resultados prueba Ø1½"

5.13.3. Escenario 3: D = Ø1¼"

Se bombeo y lleno el recipiente y se comenzó a medir el tiempo desde un punto de referencia mencionado anteriormente. No se presentaron complicaciones al presentarse la prueba. El caudal era notoriamente mucho menor por lo que la medición de tiempo era más fácil

	ESCENARIO 3		
	Ø1 ¼"		
	t (seg)	P (Bar)	Q (l/s)
1	33.19	-0.4	1.808
2	32.55	-0.4	1.843
3	31.24	-0.4	1.921
4	29.76	-0.4	2.016
5	29.24	-0.4	2.052
6	32.89	-0.4	1.824
7	29.26	-0.4	2.051
8	32.72	-0.4	1.834
9	31.31	-0.4	1.916
10	30.29	-0.4	1.981
11	30.51	-0.4	1.967
12	30.75	-0.4	1.951
13	29.44	-0.4	2.038
14	31.41	-0.4	1.91
15	30.22	-0.4	1.985
16	30.33	-0.4	1.978
17	31.35	-0.4	1.914
18	31.19	-0.4	1.924
19	28.93	-0.4	2.074
20	30.35	-0.4	1.977



Tabla 9 Resultados prueba Ø1¼"

5.13.4. Escenario 4: D = Ø1"

Se bombeo y lleno el recipiente y se comenzó a medir el tiempo desde un punto de referencia mencionado anteriormente. No hubo cebado inmediato y fue necesario un segundo bombeo mientras se drenaba para poder tomar las medidas del caudal.

ESCENARIO 4			
Ø1 "			
	t (seg)	P (Bar)	Q (l/s)
1	69	-0.5	0.87
2	66	-0.5	0.909
3	65.87	-0.5	0.911
4	66.28	-0.5	0.905
5	65	-0.5	0.923
6	63	-0.5	0.952
7	65.79	-0.5	0.912
8	64.66	-0.5	0.928
9	66.36	-0.5	0.904
10	66.51	-0.5	0.902
11	65.37	-0.5	0.918
12	65.03	-0.5	0.923
13	64.8	-0.5	0.926
14	64.98	-0.5	0.923
15	64.56	-0.5	0.929
16	64.49	-0.5	0.93
17	64.44	-0.5	0.931
18	63.01	-0.5	0.952
19	65.03	-0.5	0.923
20	64	-0.5	0.938



Tabla 10 Resultados prueba Ø1"

Capítulo IV: Calculo y análisis de resultados

6.1. Consideraciones previas para el calculo

Debido a que los cálculos son complejos de desarrollar manualmente o de forma directa debido a la forma implícita de la ecuación de Colebrook-White, se procederá a realizar estos cálculos de forma iterativa con una rutina elaborada en el lenguaje de VBA (Visual Basic for Applications) dado a su ventaja de que puede ser implementado fácilmente en el programa de Microsoft Excel. El diagrama de flujo de cómo se aplicará el código se explicará más adelante.

Para lograr esto primero debemos tener en claro las ecuaciones que utilizaremos por lo que se partirá de la ecuación simplificada mencionada en la sección del marco teórico.

$$Z_1 - Z_2 = \frac{V_2^2}{2g} + \Sigma h_f + \Sigma h_k \quad (8)$$

Hay que mencionar que la siguiente ecuación se adecua al experimento ya que cumple las siguientes condiciones:

- a) Sistema de una sola bajante de drenaje.
- b) Descarga libre al final del recorrido del sistema.
- c) Existencia casi nula de aire dentro del sistema

De la formula, el lado izquierdo de la ecuación representa la altura desde el sumidero hasta el nivel de descarga y la velocidad V_2 es la que nos daría el caudal óptimo para las condiciones dadas (nula presencia de aire dentro del sistema, longitud horizontal y vertical constante).

Para hallar h_f se utilizará la ecuación de Darcy-Weisbach y para las pérdidas de cargas locales (h_k) la ecuación que involucra una constante K. Entonces, la ecuación queda de la siguiente forma.

$$\Delta Z = \frac{V_2^2}{2g} + \sum_{i=1}^n f_2 \left(\frac{L_i}{D} \right) \left(\frac{V_2^2}{2g} \right) + f_1 \left(\frac{L_c}{D} \right) \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) + \sum_{i=1}^n K_i \left(\frac{V_2^2}{2g} \right) \quad (9)$$

Donde:

V_2 = Velocidad en la tubería principal

V_1 = Velocidad en la cola de tubería

f_1 = Coeficiente de la tubería principal

f_2 = Coeficiente de la cola de tubería

D_2 = Diámetro de tubería principal

D_1 = Diámetro de cola de tubería

L_c = Longitud de cola de tubería

L_i = Longitud de tubería principal

Sin embargo, sabemos que el caudal en todo el recorrido es el mismo por lo que se cumple la ecuación de la continuidad de la siguiente manera:

$$Q = V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (10)$$

$$Q = \frac{V_1 \pi D_1^2}{4} = \frac{V_2 \pi D_2^2}{4} \quad (11)$$

$$Q = (V_1 D_1^2) = (V_2 D_2^2) \quad (12)$$

$$V_1 = \frac{V_2 D_2^2}{D_1^2} \quad (13)$$

Reemplazando en la primera ecuación nos quedaría lo siguiente:

$$\Delta Z = \frac{V_2^2}{2g} + \sum_{i=1}^n f_2 \left(\frac{L_i}{D_2} \right) \left(\frac{V_2^2}{2g} \right) + f_1(L_c) \frac{V_2^2 D_2^4}{2D_1^5 g} + \sum_{i=1}^n K_i \left(\frac{V_2^2}{2g} \right) \quad (14)$$

Factorizando quedaría la siguiente expresión:

$$\Delta Z = \frac{V_2^2}{2g} \left[1 + \frac{f_2}{D_2} \sum_{i=1}^n L_i + \sum_{i=1}^n K_i + f_1(L_c) \frac{D_2^4}{D_1^5} \right] \quad (15)$$

De la anterior ecuación nuestra incógnita será hallar el valor de la velocidad V_2 , ya que una vez hallada su valor es posible hallar el caudal usando la ecuación de la continuidad. Sin embargo, se presenta el problema de hallar el valor de f tanto para la tubería principal como para la cola de tubería. La ecuación de Colebrook-White nos presenta una ecuación implícita en el cual la incógnita f esta en ambos lados de ecuación.

Para resolver este problema, es importante encontrar una solución a la ecuación de Colebrook-White que sea de manera rápida y confiable. Dado que esta ecuación es implícita y no se puede resolver de forma directa, se requiere usar un método iterativo. Uno de los métodos más utilizados y confiables para este propósito es el método de Newton-Raphson. Este método iterativo se basa en aproximaciones sucesivas para encontrar las soluciones a polinomios, acercándose a la solución con un error que es definido antes de aplicar el método. Para entender el procedimiento se definirá este método de la siguiente forma:

Se tiene que $f(x) = 0$. Entonces se parte de un x_0 y se aplica la siguiente ecuación.

$$x_{r+1} = x_r - \frac{f(x_r)}{f'(x_r)} \quad (16)$$

Si no se cumple que $|x_1 - x_0| < e$ (donde e es el error permitido al realizar el método) se prosigue con la siguiente iteración donde $x_1 = x_0$.

Sabiendo esto se puede aplicar este método para hallar el valor de f en la ecuación de Colebrooke-White de la siguiente manera:

Partiendo de la ecuación original

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2.51}{Re \sqrt{f}} + \frac{\varepsilon}{3.71D} \right) \quad (17)$$

Donde

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (18)$$

Hacemos un cambio de variable para facilitar el uso del método

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = x \quad (19)$$

Entonces

$$x = -2 \log \left(\frac{2.51x}{Re} + \frac{\varepsilon}{3.71D} \right) \quad (20)$$

Definimos la función $G(x)$ pasando x al lado derecho e igualando a 0

$$G(x) = -2 \log \left(\frac{2.51x}{Re} + \frac{\varepsilon}{3.71D} \right) - x = 0 \quad (21)$$

Hallamos la derivada de la función $G(x)$.

$$G'(x) = -\frac{2}{\ln 10} \left(\frac{\frac{2.51x}{Re}}{\frac{2.51x}{Re} + \frac{\varepsilon}{3.71D}} \right) = 0 \quad (22)$$

$$G'(x) = -\frac{2}{\ln 10} \left(\frac{\frac{2.51x}{Re}}{\frac{2.51x(3.71D) + \varepsilon Re}{Re 3.71D}} \right) \quad (23)$$

Resolviendo y simplificando se obtiene la siguiente expresión.

$$G'(x) = -\frac{2}{\ln 10} \left(\frac{9.3121xD}{9.3121xD + \varepsilon Re} \right) \quad (24)$$

Con los resultados ya podemos reemplazar en el método de Newton-Raphson comenzando desde un x_0 el cual será un valor asumido, mientras más cerca este el valor asumido del resultado menor será el número de iteraciones.

$$x_{r+1} = x_r - \frac{G(x_r)}{G'(x_r)} \quad (25)$$

$$x_1 = x_0 - \left(\frac{-2 \log \left(\frac{2.51x_0}{Re} + \frac{\varepsilon}{3.71D} \right) - x_0}{-\frac{2}{\ln 10} \left(\frac{9.3121x_0D}{9.3121x_0D + \varepsilon Re} \right)} \right) \quad (26)$$

Una vez teniendo hallado el valor de x se procede a hallar el valor de f debido al cambio de variable que realizamos anteriormente.

$$\left(\frac{1}{x} \right)^2 = f \quad (27)$$

De esta manera podemos hallar el valor de f , sin embargo, se presenta otro problema ya que f depende del número de Reynolds que a su vez depende de la velocidad que queremos hallar. Observando que no hay manera sencilla de unificar ambas ecuaciones se puede utilizar nuevamente otro método iterativo asumiendo una velocidad.

Una vez que asumamos esa velocidad podremos hallar f para después proceder a comprobar la velocidad que hemos supuesto reemplazándolo en la ecuación. Es en este punto donde será necesaria las iteraciones, para reducir el número de iteración y llegar más rápido a una solución aplicaremos el método de Newton-Raphson nuevamente a la fórmula de velocidad.

$$\Delta Z = \frac{V_2^2}{2g} \left[1 + \frac{f_2}{D_2} \sum_{i=1}^n L_i + \sum_{i=1}^n K_i + f_1(L_c) \frac{D_2^4}{D_1^5} \right] \quad (28)$$

Definimos la ecuación $E(V_2)$ para poder dar forma al método de iteración.

$$E(V_2) = \frac{V_2^2}{2g} \left[1 + \frac{f_2}{D_2} \sum_{i=1}^n L_i + \sum_{i=1}^n K_i + f_1(L_c) \frac{D_2^4}{D_1^5} \right] - \Delta Z = 0 \quad (29)$$

Hallamos la derivada de la función $E(V_2)$.

$$E'(V_2) = \frac{V_2}{g} \left[1 + \frac{f_2}{D_2} \sum_{i=1}^n L_i + \sum_{i=1}^n K_i + f_1(L_c) \frac{D_2^4}{D_1^5} \right] \quad (30)$$

Con las ecuaciones ya establecidas podemos aplicarlas en el método de Newton-Rapshon.

$$x_{r+1} = x_r - \frac{E(x_r)}{E'(x_r)} \quad (31)$$

Reemplazando cuando $x_r = x_0$ queda de la siguiente forma:

$$x_1 = x_0 - \left(\frac{\frac{x_0^2}{2g} \left[1 + \frac{f_2}{D_2} \sum_{i=1}^n L_i + \sum_{i=1}^n K_i + f_1(L_c) \frac{D_2^4}{D_1^5} \right] - \Delta Z}{\frac{x_0}{g} \left[1 + \frac{f_2}{D_2} \sum_{i=1}^n L_i + \sum_{i=1}^n K_i + f_1(L_c) \frac{D_2^4}{D_1^5} \right]} \right) \quad (32)$$

Es importante mencionar que se tomará como referencia para los coeficientes de pérdida de carga localizada lo mencionado por Crane⁶, en donde las pérdidas de carga de los codos están en función del coeficiente f por lo que también tendrá que ser añadido en la iteración al ser f una incógnita.

Una vez con todas las ecuaciones ya definidas y la forma en la cual estas van a ser utilizadas para hallar una velocidad la cual nos llevara a un caudal óptimo, se procede a elaborar una rutina en VBA (Visual Basic for Applications) siguiendo la metodología que se detalló anteriormente y plasmada en el siguiente diagrama que se presenta a continuación:

⁶ Crane Technical Paper No. 410

6.2. Diagrama de flujo para el cálculo del caudal óptimo

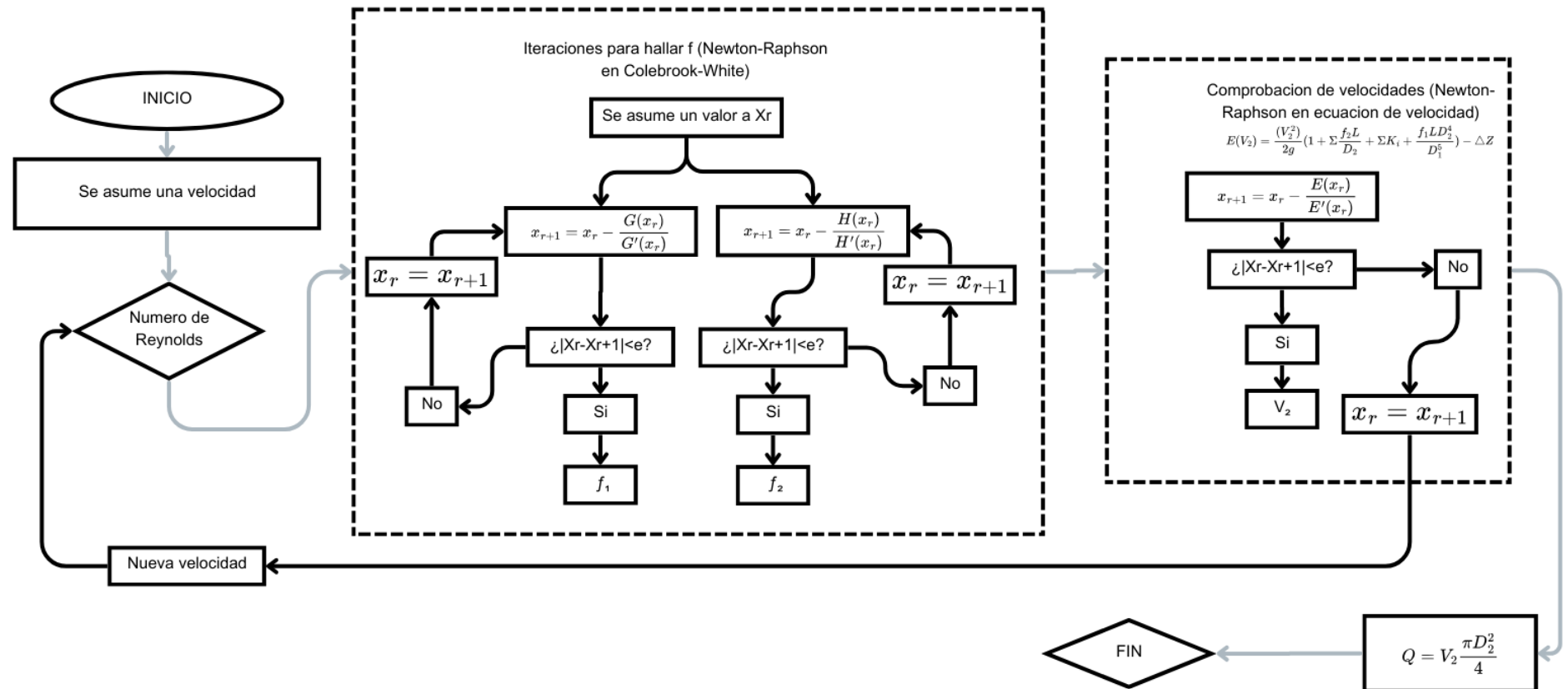


Figura 33 Diagrama de flujo para cálculo

Este flujo nos ayuda a elaborar el cálculo iterativo. El código utilizado en esta rutina la cual sigue el diagrama de flujo anteriormente descrito y que también utiliza todas las ecuaciones anteriormente descritas se detallará en el Anexo N°2.

6.3. Cálculo hidráulico de las diferentes pruebas

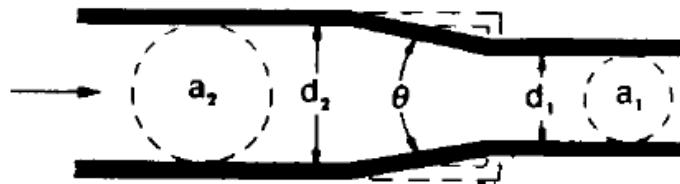
Para el cálculo hidráulico debemos tener en cuenta la siguiente ecuación descrita anteriormente.

$$\Delta Z = \frac{V_2^2}{2g} \left[1 + \frac{f_2}{D_2} \sum_{i=1}^n L_i + \sum_{i=1}^n K_i + f_1(L_c) \frac{D_2^4}{D_1^5} \right] \quad (33)$$

Para el valor de K se tomará como referencia lo mencionado por Crane

6.3.1. Coeficiente K para pérdida de carga locales

a. Estrechamiento brusco



$$K = \frac{0.5(1 - \beta^2) \sqrt{\sin \frac{\theta}{2}}}{\beta^4} \quad (34)$$

b. Ensanchamiento brusco



$$K = \frac{(1 - \beta^2)}{\beta^4} \quad (35)$$

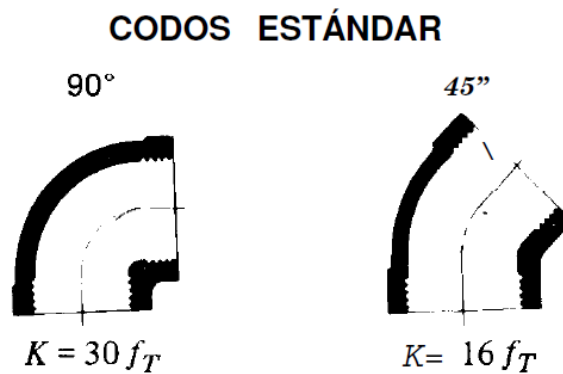
$$\beta = \frac{d_1}{d_2} \quad (36)$$

Donde:

$d_1 = \text{Diámetro menor}$

$d_2 = \text{Diámetro mayor}$

c. Codos



d. Sumidero

El coeficiente de pérdida de carga en el sumidero dependerá de las características de la cobertura (en este caso vendría a ser el recipiente) como la forma de sumidero. De esta manera no hay una forma fija de calcular el valor de K ya que este deberá ser calculado experimentalmente para cada caso.

Se asumirá un valor de K para el sumidero de 2 debido a q es el valor que representa mejor los resultados de todos los experimentos.

6.3.2. Cálculos prueba tubería Ø2"

A. Datos

a. **Altura** = 6.15 m

b. **Tubería Principal**

	Longitud Horizontal (m)	Longitud Vertical (m)	Total (m)
Ø2"	2.5	5.5	8

c. **Cola de Tubería**

	Lc (m)
Ø1½"	0.48

d. **Coefficientes de perdidas de carga locales**

Datos para el estrechamiento y ensanchamiento

	d1 (m)	d2 (m)	β	θ°
Reducción/aumento	0.043	0.0542	0.793357934	57

Valores de K para perdidas de carga locales

Elemento	Cantidad	K	Total K
Reducción	1	0.303193034	0.303193
Aumento	1	0.346652832	0.3466528
Sumidero	1	2	2
Codo 45°	2	16f	32f
Codo 90°	1	30f	30f

e. **Datos físicos**

	ε (m)	Din (m)	Area (m²)	εt	v (m/s)
PVC	0.002	0.0542	0.002307217	0.0369004	1E-06
PVC	0.002	0.043	0.001452201	0.0465116	1E-06

B. Resultados

	Velocidad (m/s)	Reynolds	f	Caudal (m³/s)	Caudal (l/s)
Tubería principal	2.5248915	136439.801	0.062553577	0.0058255	5.82547
Cola tubería	4.0114777	171977.609	0.069259698		

6.3.3. Cálculos prueba tubería Ø1½"

A. Datos

a. **Altura** = 6.15 m

b. **Tubería Principal**

	Longitud Horizontal (m)	Longitud Vertical (m)	Total (m)
Ø1½"	2.5	5.5	8

c. **Cola de Tubería**

	Lc (m)
Ø1¼"	0.3

d. **Coefficientes de pérdidas de carga locales**

Datos para el estrechamiento y ensanchamiento

	d1 (m)	d2 (m)	β	θ°
Reducción/aumento	0.039	0.0434	0.73156682	57

Valores de K para pérdidas de carga locales

Elemento	Cantidad	K	Total K
Reducción	1	0.525980485	0.5259805
Aumento	1	0.754284011	0.754284
Sumidero	1	2	2
Codo 45°	2	16f	32f
Codo 90°	1	30f	30f

e. **Datos físicos**

	ε (m)	Din (m)	Area (m²)	ε_t	v (m/s)
PVC	0.002	0.0434	0.001479345	0.0460829	1E-06
PVC	0.002	0.039	0.001194591	0.0512821	1E-06

B. Resultados

	Velocidad (m/s)	Reynolds	f	Caudal (m³/s)	Caudal (l/s)
Tubería principal	2.3282499	100743.813	0.0690679	0.0034443	3.44428
Cola tubería	2.8832336	112109.782	0.07251166		

6.3.4. Cálculos prueba tubería Ø1¼"

A. Datos

a. **Altura** = 6.15 m

b. **Tubería Principal**

	Longitud Horizontal (m)	Longitud Vertical (m)	Total (m)
Ø1¼"	2.5	5.5	8

c. **Cola de Tubería**

	Lc (m)
Ø1"	0.35

d. **Coefficientes de perdidas de carga locales**

Datos para el estrechamiento y ensanchamiento

	d1 (m)	d2 (m)	β	θ°
Reducción/aumento	0.0265	0.0343	0.772594752	67

Valores de K para perdidas de carga locales

Elemento	Cantidad	K	Total K
Reducción	1	0.391612226	0.3916122
Aumento	1	0.456050429	0.4560504
Sumidero	1	2	2
Codo 45°	2	16f	32f
Codo 90°	1	30f	30f

e. **Datos físicos**

	ε (m)	Din (m)	Area (m²)	εt	v (m/s)
PVC	0.002	0.0343	0.000924013	0.058309	1E-06
PVC	0.002	0.0265	0.000551546	0.0754717	1E-06

B. Resultados

	Velocidad (m/s)	Reynolds	f	Caudal (m³/s)	Caudal (l/s)
Tubería principal	1.9985974	68346.849	0.077160489	0.0018467	1.84673
Cola tubería	3.3482803	88464.0351	0.087578814		

6.3.5. Cálculos prueba tubería Ø1"

A. Datos

a. **Altura** = 6.15 m

b. **Tubería Principal**

	Longitud Horizontal (m)	Longitud Vertical (m)	Total (m)
Ø1"	2.5	5.5	8

c. **Cola de Tubería**

	Lc (m)
Ø3/4"	0.35

d. **Coefficientes de perdidas de carga locales**

Datos para el estrechamiento y ensanchamiento

	d1 (m)	d2 (m)	β	θ°
Reducción/aumento	0.0181	0.0265	0.683018868	58

Valores de K para perdidas de carga locales

Elemento	Cantidad	K	Total K
Reducción	1	0.800247808	0.8002478
Aumento	1	1.307717664	1.3077177
Sumidero	1	2	2
Codo 45°	2	16f	32f
Codo 90°	1	30f	30f

e. **Datos físicos**

	ε (m)	Din (m)	Area (m²)	ε_t	v (m/s)
PVC	0.002	0.0265	0.000551546	0.0754717	1E-06
PVC	0.002	0.0181	0.000257304	0.1104972	1E-06

B. Resultados

	Velocidad (m/s)	Reynolds	f	Caudal (m³/s)	Caudal (l/s)
Tubería principal	1.5979466	42218.929	0.087809441	0.0008813	0.88134
Cola tubería	3.4252862	61812.2442	0.107607864		

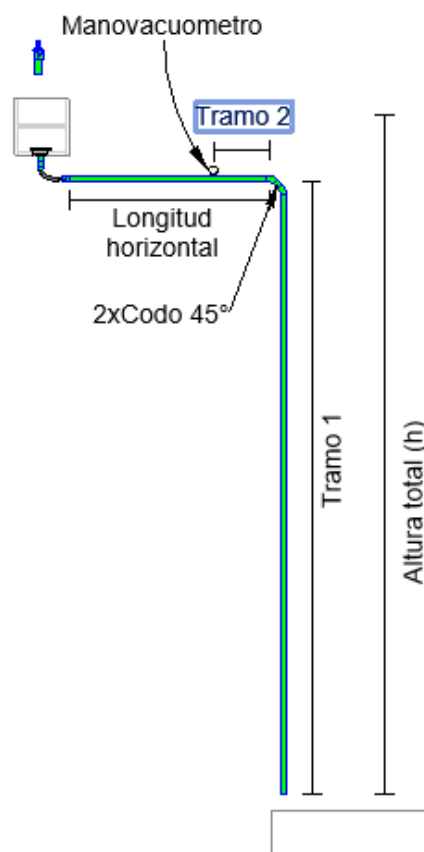
6.4. Cálculo de presión

Con el fin de poder visualizar cómo se comporta la presión se instaló un manovacuometro en la línea horizontal del sistema. Para hallar su cálculo se usará la fórmula de Darcy-Weisbach para hallar la pérdida de carga a lo largo de recorrido. Para el factor f se usará la ecuación de Colebrooke-White conforme al diagrama de flujo en la Ilustración 6.2 mencionados capítulos anteriores.

Para el cálculo se ha seguido las indicaciones según (American Society of Plumbing Engineers, 2018) el cual menciona que el cálculo debe comenzar aguas abajo

Figura 34

Diagrama del experimento para cálculo de presión



Se considerará 2 tramos siendo el primero la vertical, el segundo será el tramo adyacente a los codos. Como se está considerando un cálculo donde se empezará desde abajo la carga disponible se estará considerando como negativa.

6.4.1. Cálculos prueba de presión tubería Ø2"

• Pérdida de carga en el tramo 1

D (m)	L(m)	Q (l/s)	Q (m/s)	V (m/s)	ε (m)	ε_t	v (m/s)	Re	f	hf (m)
0.0542	5.5	5.825472776	0.00582547	2.524891513	0.002	0.0369004	1.003E-06	136439.801	0.06255	2.06253816

• Pérdida de carga por accesorios

Elemento	Cantidad	K	Total K	Hf
Codo 45°	2	16f	2.0017145	0.65041203

• Pérdida de carga en el tramo 2

D (m)	L(m)	Q (l/s)	Q (m/s)	V (m/s)	ε (m)	ε_t	v (m/s)	Re	f	hf (m)
0.0542	0.6	5.825472776	0.00582547	2.524891513	0.002	0.0369004	1.003E-06	136439.801	0.06255	0.22500416

Carga disponible (h)= -6.15 m

Diferencia de altura (z)= 5.5 m

Pérdida de carga en recorrido (Σhf)= 2.93795435 m

Presión manovacuómetro= $h+z-\Sigma hf$

P=	-3.58795435 m
P=	-0.35185682 bar

6.4.2. Cálculos prueba de presión tubería Ø1½"

• Pérdida de carga en el tramo 1

D (m)	L(m)	Q (l/s)	Q (m/s)	V (m/s)	ε (m)	ε_t	v (m/s)	Re	f	hf (m)
0.0434	5.5	3.444283789	0.00344428	2.328249869	0.002	0.0460829	1.003E-06	100743.813	0.06907	2.41829559

• Pérdida de carga por accesorios

Elemento	Cantidad	K	Total K	Hf
Codo 45°	2	16f	2.2101728	0.61064162

• Pérdida de carga en el tramo 2

D (m)	L(m)	Q (l/s)	Q (m/s)	V (m/s)	ε (m)	ε_t	v (m/s)	Re	f	hf (m)
0.0434	1.57	3.444283789	0.00344428	2.328249869	0.002	0.0460829	1.003E-06	100743.813	0.06907	0.69031347

Carga disponible (h)= -6.15 m

Diferencia de altura (z)= 5.5 m

Pérdida de carga en recorrido (Σhf)= 3.71925068 m

Presión manovacuómetro= $h+z-\Sigma hf$

P=	-4.36925068 m
P=	-0.42847553 bar

6.4.3. Cálculos prueba de presión tubería Ø1¼"

• Pérdida de carga en el tramo 1

D (m)	L(m)	Q (l/s)	Q (m/s)	V (m/s)	ε (m)	ε _t	v (m/s)	Re	f	hf (m)
0.0343	5.5	1.846730123	0.00184673	1.998597371	0.002	0.058309	1.003E-06	68346.8493	0.07716	2.51892456

• Pérdida de carga por accesorios

Elemento	Cantidad	K	Total K	Hf
Codo 45°	2	16f	2.4691356	0.50268574

• Pérdida de carga en el tramo 2

D (m)	L(m)	Q (l/s)	Q (m/s)	V (m/s)	ε (m)	ε _t	v (m/s)	Re	f	hf (m)
0.0343	0.9	1.846730123	0.00184673	1.998597371	0.002	0.058309	1.003E-06	68346.8493	0.07716	0.41218765

Carga disponible (h)= -6.15 m

Diferencia de altura (z)= 5.5 m

Perdida de carga en recorrido (Σhf)= 3.43379796 m

Presion manovauometro= $h+z-\Sigma hf$

P=	-4.08379796 m
P=	-0.40048228 bar

6.4.4. Cálculos prueba de presión tubería Ø1"

• Pérdida de carga en el tramo 1

D (m)	L(m)	Q (l/s)	Q (m/s)	V (m/s)	ε (m)	ε_t	v (m/s)	Re	f	hf (m)
0.0265	5.5	0.881340852	0.00088134	1.597946637	0.002	0.0754717	1.003E-06	42218.9291	0.08781	2.37183005

• Pérdida de carga por accesorios

Elemento	Cantidad	K	Total K	Hf
Codo 45°	2	16f	2.8099021	0.36569307

• Pérdida de carga en el tramo 2

D (m)	L(m)	Q (l/s)	Q (m/s)	V (m/s)	ε (m)	ε_t	v (m/s)	Re	f	hf (m)
0.0265	0.9	0.881340852	0.00088134	1.597946637	0.002	0.0754717	1.003E-06	42218.9291	0.08781	0.38811764

Carga disponible (h)= -6.15 m

Diferencia de altura (z)= 5.5 m

Pérdida de carga en recorrido (Σhf)= 3.12564077 m

Presión manovacuómetro= $h+z-\Sigma hf$

P=	-3.77564077 m
P=	-0.3702625 bar

6.4.5. Análisis de resultados

De lo calculado anteriormente se obtiene los siguientes resultados de los caudales con sus respectivos errores.

Tabla 11

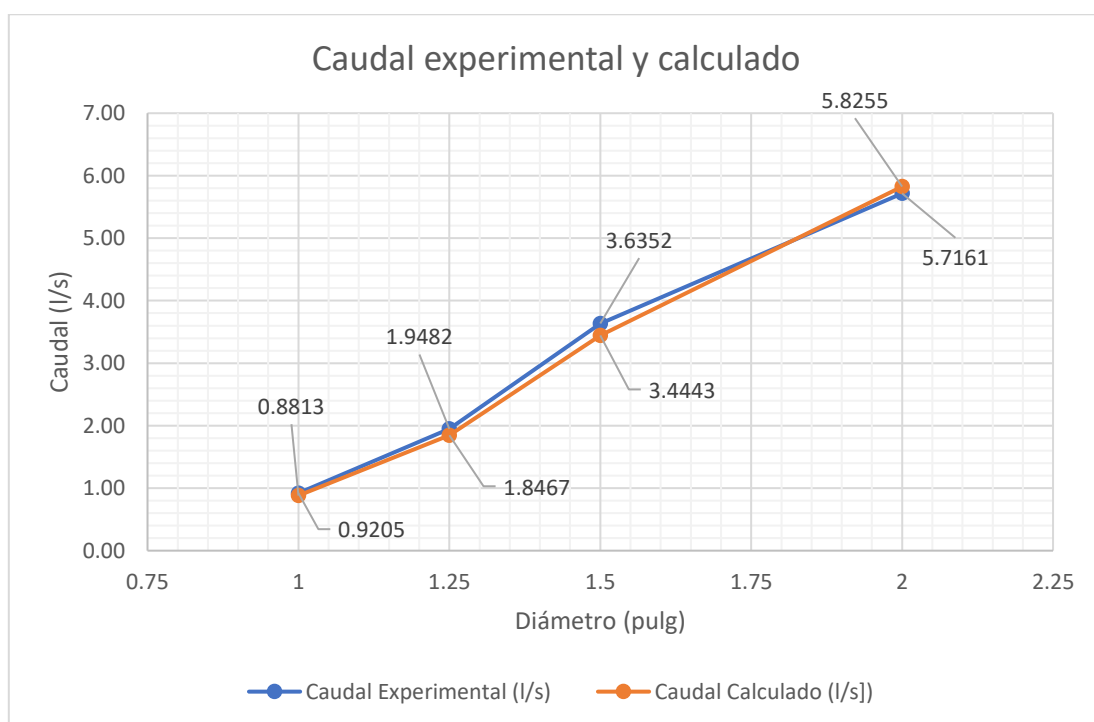
Resultados y errores en tuberías principales (Caudal)

Diámetro	Ø1"	Ø1¼"	Ø1½"	Ø2"
Caudal Experimental (l/s)	0.9205	1.9482	3.6352	5.7161
Caudal Calculado (l/s)	0.8813	1.8467	3.4443	5.8255
Error%	4.2513	5.2079	5.2509	1.9130

Gráficamente se representa de la siguiente manera.

Figura 35

Caudal experimental y calculado en tuberías principales



Con estos resultados se procede a analizar las velocidades en las tuberías principales

Tabla 12

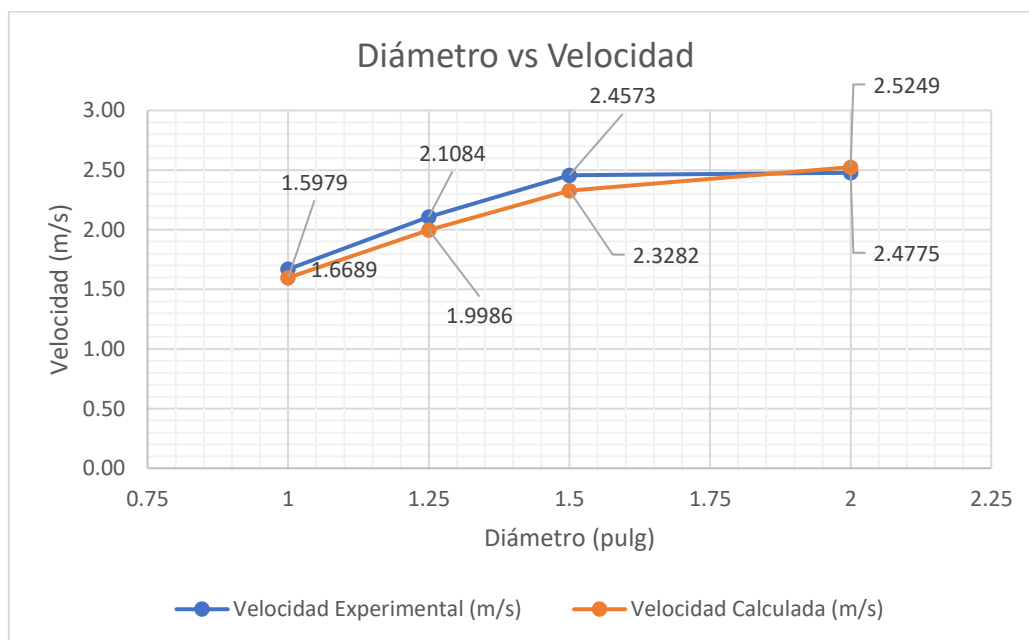
Resultados y errores en tuberías principales (Velocidad)

Diámetro	Ø1"	Ø1¼"	Ø1½"	Ø2"
Velocidad Experimental (m/s)	1.6689	2.1084	2.4573	2.4775
Velocidad Calculada (m/s)	1.5979	1.9986	2.3282	2.5249
Error%	4.2513	5.2079	5.2509	1.9130

Gráficamente se representa de la siguiente forma

Figura 36

Velocidad experimental y calculada tuberías principales



Para las colas de tuberías se tiene las siguientes velocidades

Tabla 13

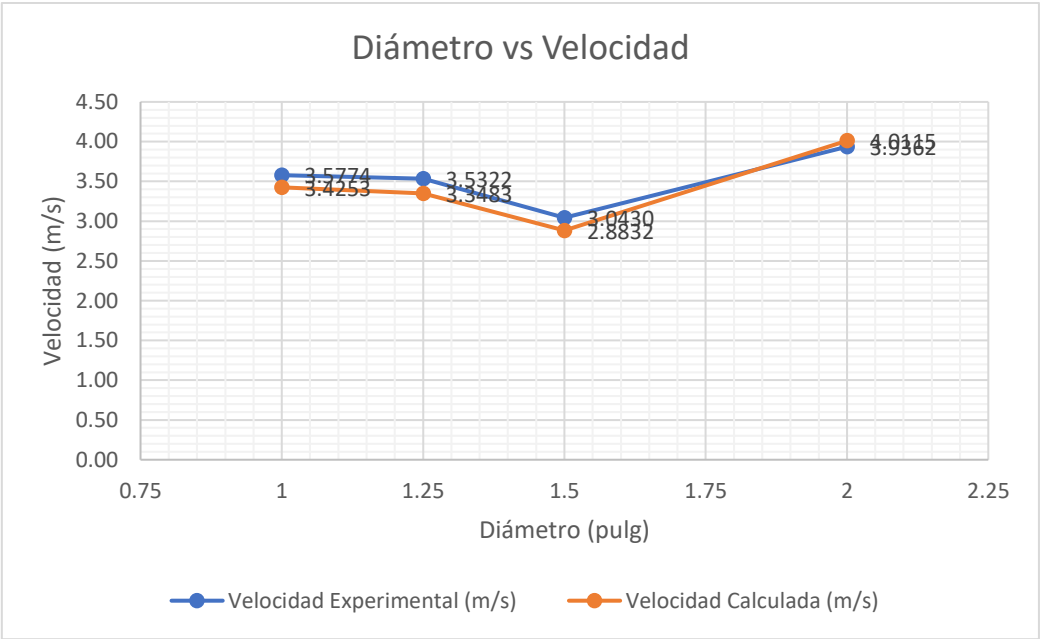
Resultados y errores en colas de tuberías (Velocidad)

Diámetro	Ø1"	Ø1¼"	Ø1½"	Ø2"
Velocidad Experimental (m/s)	3.5774	3.5322	3.0430	3.9362
Velocidad Calculada (m/s)	3.4253	3.3483	2.8832	4.0115
Error%	4.2513	5.2079	5.2509	1.9130

Gráficamente se representa de la siguiente forma:

Figura 37

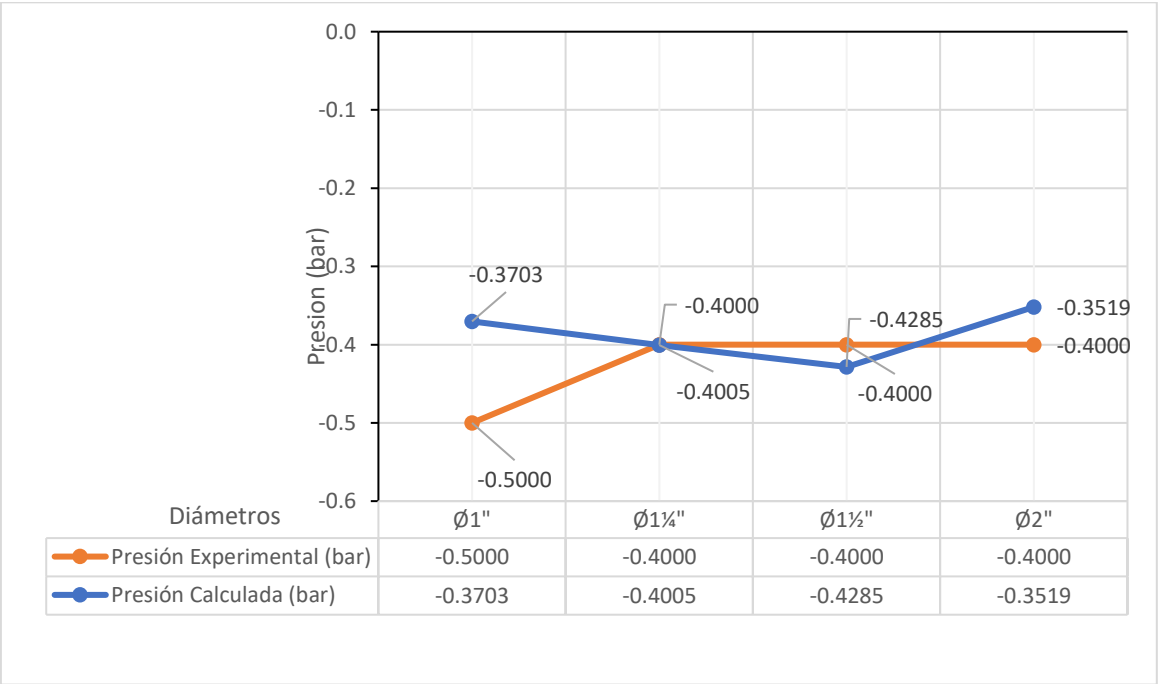
Velocidad experimental y calculada para colas de tuberías



Para las presiones en los puntos en donde se instaló los manovacuumetros

Figura 38

Presión calculada y experimental



Para el cálculo de los errores se tiene:

Tabla 14

Resultados y errores (Presión)

Diámetro	Ø1"	Ø1¼"	Ø1½"	Ø2"
Presión Experimental (bar)	-0.5000	-0.4000	-0.4000	-0.4000
Presión Calculada (bar)	-0.3703	-0.4005	-0.4285	-0.3519
Error%	25.9475	0.1206	7.1189	12.0358

De los gráficos 6.1 y 6.2 se aprecia que a medida que aumenta el diámetro de la tubería, el caudal incrementa de manera rápida (este comportamiento se aprecia más en los resultados estimados hallados en el Anexo N°1), mientras que la velocidad en la línea principal (la de mayor diámetro) tiende a tener un comportamiento donde a mayor diámetro se obtiene menor velocidad. A diferencia de la velocidad en las tuberías principales, en las colas de tuberías la tendencia es al contrario la velocidad conforme el diámetro se incrementa también lo hace la velocidad.

Del gráfico 6.4 se observa que las presiones calculadas en los puntos considerados para el manovacumetro se asemejan en gran medida a los experimentados en los diámetros de 1¼" y 1½", siendo el error máximo de 7.1189%.

Para Ø2" el error aumenta a 12.0358% aunque la diferencia numérica es de 0.481, es importante mencionar que con el tipo de manovacumetro utilizado la lectura de las presiones un poco imprecisa debido a la cercanía de las marcas por lo que esa diferencia está dentro del rango de error.

Para el diámetro de 1" el error sube hasta 25.9475% y la diferencia numérica es de 0.8703. Si bien hay errores visuales por tema de las marcas muy juntas, esta diferencia es muy notoria por lo que es probable que haya otro factor afectando la presión medida. Para la prueba de este diámetro hubo ciertos inconvenientes con el tema del cebado

por lo que es probable que esa variable que causo el inconveniente no se haya considerado al momento de hacer el cálculo de presión y he ahí el error elevado en el cálculo.

Conclusiones

- De lo experimentado se comprueba que cuando no hay existencia de aire, o en su defecto una cantidad insignificante, se genera el máximo caudal en el que el sistema puede funcionar. Con esta condición de nula existencia de aire las ecuaciones de Bernoulli y Darcy-Weisbach pueden hallar el caudal óptimo para este tipo de sistemas sifónicos.
- Cuando en el sistema existe una cantidad considerable de aire el sistema no llega a cebar o se forma un cebado incompleto. Esto físicamente se puede apreciar en el flujo de agua llegando a ser visualmente de un tono blanco cuando por otro lado en un completo cebado el flujo de agua es uniforme y transparente.
- La presencia del baffle o plato antivortex no afecta la formación del cebado, pero si la mantiene por más tiempo. En la experimentación el caudal y presión obtenida es el mismo con o sin plato antivortex ya que al momento de cebarse este adoptaba el funcionamiento sifónico con las mismas características, sin embargo, cuando llega a su altura de sumergencia crítica se generan vórtices los cuales detienen el comportamiento sifónico del sistema por ende el tiempo de drenado del recipiente se incrementa. El plato antivortex impide la generación de estos vórtices, hubo casos en la experimentación en el que estos vórtices se iban formando incluso con el plato antivortex instalado sin embargo estos desaparecían al segundo por la presencia del plato.
- El caudal hallado tiene un comportamiento de crecimiento rápido conforme el diámetro va aumentando, pero la velocidad en la principal tiende a decrecer en diámetros grandes (Ver Anexo 1).
- La carga hidráulica de un sistema de una bajante, como el experimentado, está determinada por la altura medida desde el tirante de agua del recipiente hasta la descarga en la tubería vertical. Esto pudo ser comprobado con los cálculos de pérdida de carga hacia el punto del manovacómetro.

Recomendaciones

- Para un resultado más confiable se requiere de eliminar el ingreso de aire, ya sea evitando descargas libres que generen turbulencia y por ende entrada de burbujas de aire, así como el uso de un plato antivortex o baffle que impida la formación de vórtices en el punto del sumidero.
- El cálculo es sensible a la precisión de la medición de diámetro de la tubería, una variación de unas milésimas puede modificar en gran medida el cálculo del caudal. El uso de herramientas de medición de alta precisión es necesario para un resultado confiable.
- Al usarse una motobomba en el experimento este generaba vibraciones que agitaban el agua por lo que cantidades de aire ingresaban al sistema. Para próximas investigaciones se deberá optar por un sistema de impulsión que no genere tantas vibraciones.
- Si bien no se ha profundizado sobre las características del plato antivortex en esta investigación, de lo observado se pudo apreciar que el tamaño puede tener cierto efecto en la formación de los vórtices. En ciertos momentos se apreció la formación de un vórtice incluso con el plato antivortex el cual desapareció al instante de haberse formado. Es posible que con un plato antivortex más pequeño estas formaciones de vórtice hayan sido más recurrentes.
- Se debe de estudiar más a fondo sobre las constantes K de las pérdidas locales para obtener resultados más confiables.
- Se debe de analizar a fondo el impacto que tiene las velocidades en las colas de tuberías ya que al aumentar el diámetro las velocidades aumentan también habiendo riesgo de una posible cavitación.

Referencias bibliográficas

- American Society of Plumbing Engineers. (2018). *Siphonic Roof Drainage ASPE/ANSI 45-2018*.
- Arroyo Quintero, H., & Garcia Diaz, H. (2016). *Estudio del comportamiento hidráulico de un sistema de drenaje pluvial en cubiertas y áreas privadas de edificaciones*. Cartagena: Universidad de Cartagena.
- Arthur, S. (1998). *The Priming Focussed Design of Siphonic Roof Drainage*. Edimburgo, Escocia.
- Arthur, S., & Swaffield, J. (2001). *Siphonic roof drainage: current understanding*. Scotland: Urban Water.
- British Standards . (2007). *Guide to Siphonic Roof Drainage Systems BS 8490:2007*. United Kingdom.
- Fucik, D., & Rucka, J. (2019). *Review of Siphonic Roof Drainage Systems*. Brno.
- Lucke, T., & Beecham, S. (2014). *Alternative low-cost overflows for siphonic roof drainage systems*. Australia: Elsevier.
- May, R. W. (2004). *Siphonic Roof Drainage Calculations*. HR Wallingford.
- PhilipRains, J. (2008). *Hydraulic Characteristics of Siphonic Roof Drainage Outlets*. Salford.
- R.M.P May, M. M. (1997). *The Design of Conventional and Siphonic Roof-Drainage Systems*.
- Rattenbury, J. (2012). *Siphonic Roof Drainage Calculations*.
- Vindeirinho Rino, E. J. (2011). *Rain and Ground Water Drainage for Building*. Lisboa.
- Zubieta Zuluaga, D. F. (2013). *Diseño de sifón hidráulico para un sistema piloto de humedales híbridos como Post-Tratamiento de aguas residuales de una porcícola*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

Glosario

1. **Caudal:** La cantidad de líquido que fluye a través de una sección transversal de una tubería o canal en un período de tiempo dado.
2. **Cavitación:** La formación y colapso de burbujas de vapor en un líquido debido a una reducción súbita de la presión, lo que puede causar daños en las superficies expuestas.
3. **Carga disponible:** La diferencia de altura entre el nivel del líquido en el sumidero y el nivel del líquido en la tubería de salida.
4. **Cebado:** El proceso de llenar una tubería o sistema con líquido para eliminar el aire y permitir un flujo continuo y eficiente.
5. **Ecuación explícita:** Es la representación de una ecuación en la que una variable está claramente despejada o aislada en uno de los lados de la igualdad.
6. **Ecuación implícita:** Es la representación de una ecuación, en la que, las variables están mezcladas en un solo lado o ambos lados de la igualdad, sin estar necesariamente despejadas o aisladas.
7. **FCR:** Falso cielo raso.
8. **Flujo anular:** El flujo que ocurre alrededor del perímetro interior de una tubería, generalmente en una tubería parcialmente llena.
9. **Pendiente:** La inclinación o declive de una superficie en relación con la horizontal.
10. **Pérdida de carga:** La disminución de presión o energía que ocurre debido a la fricción, obstrucciones u otros factores en el sistema.
11. **Plato antivortex:** Elemento que evita la formación de vórtices de agua en el sumidero.

12. **Presión:** La fuerza aplicada por unidad de área. En el contexto del drenaje sifónico, la presión puede referirse a la presión hidrostática del agua en el sistema.
13. **Rugosidad:** La aspereza de la superficie interna de una tubería, que puede afectar la velocidad y la resistencia del flujo de líquido.
14. **Sistema convencional:** Un sistema de drenaje que utiliza gravedad para transportar líquidos hacia un punto de recolección.
15. **Sistema de recolección:** La red de tuberías y sumideros diseñada para recoger y transportar líquidos desde áreas específicas hacia un punto central de descarga.
16. **Sistema sifónico:** Sistema de drenaje donde se usa presiones negativas para transportar líquidos hacia un punto de recolección.
17. **Sifón:** Un dispositivo que utiliza la presión diferencial para transportar líquidos desde un nivel más alto a uno más bajo, superando obstáculos como crestas o elevaciones en el sistema de drenaje.
18. **Sumidero:** Un dispositivo diseñado para recoger y eliminar líquidos de una superficie o área, como un desagüe en el piso o en una cubierta.
19. **Tubo lleno:** Una condición en la que el fluido llena completamente el conducto, como una tubería sin aire en su interior.
20. **Viscosidad:** La resistencia de un fluido a fluir. Fluidos con alta viscosidad como el aceite fluye más lentamente que los fluidos con baja viscosidad como el agua.

Anexos

Anexo 1: Resultados estimados	1
A. Proyección de resultados de diámetros mayores.....	1
a. Cálculos en tubería Ø2½"	2
b. Cálculos en tubería Ø3"	3
c. Cálculos en tubería Ø4"	4
d. Cálculos en tubería Ø6"	5
Anexo 2: Comparación con datos extraídos de la norma NTS 110,113 y 119	8
Anexo 3: Desarrollo del código en VBA.....	11
a) Función logaritmo base 10	11
b) Función Colebrooke-White con cambio de variable.....	12
c) Derivada de función Colebrooke-White con cambio de variable	12
d) Función de Newton-Raphson para hallar el coeficiente de fricción de acuerdo con Colebrooke-White.....	12
e) Función de velocidad	14
Anexo 4: Análisis detallado del cálculo iterativo	18
a. Cálculos iterativos en tubería Ø2"	18
b. Cálculos iterativos en tubería Ø1½"	23
c. Cálculos iterativos en tubería Ø1¼"	28
d. Cálculos iterativos en tubería Ø1"	32
Anexo 5: Panel fotográfico.....	37

Anexo 1: Resultados estimados

Con los datos experimentales ya validados contra los datos calculados, es posible realizar un cálculo de resultados variando a un diámetro de mayor dimensión y la altura, parámetros que no fueron modificados en el experimento. Si bien no forman parte del objetivo principal de esta tesis es importante mencionarlo para conocer el comportamiento del caudal en futuras investigaciones.

A. Proyección de resultados de diámetros mayores

Habiendo comprobado que el método utilizado para calcular el caudal óptimo es confiable debido al error calculado, podemos proyectar el cálculo para diámetros que no se experimentaron en campo.

A continuación, se mostrarán cálculos estimados para los diámetros de $\varnothing 2\frac{1}{2}$ ", $\varnothing 3$ ", $\varnothing 4$ " Y $\varnothing 6$ " manteniendo la misma figura del experimento (longitud de tubería vertical y horizontal). Se han tomado algunos valores asumidos como el ángulo de las reducciones y el largo de la cola de tubería

a. Cálculos en tubería Ø2½"

A. Datos

a. **Altura** = 6.15 m

b. **Tubería Principal**

	Longitud Horizontal (m)	Longitud Vertical (m)	Total (m)
Ø2½"	2.5	5.5	8

c. **Cola de Tubería**

	Lc (m)
Ø2"	0.35

d. **Coeficientes de perdidas de carga locales**

Datos para el estrechamiento y ensanchamiento

	d1 (m)	d2 (m)	β	θ°
Reducción/aumento	0.0542	0.066	0.821212121	58

Valores de K para perdidas de carga locales

Elemento	Cantidad	K	Total K
Reducción	1	0.233727654	0.2337277
Aumento	1	0.233117997	0.233118
Sumidero	1	2	2
Codo 45°	2	16f	32f
Codo 90°	1	30f	30f

e. **Datos físicos**

	ε (m)	Din (m)	Area (m²)	ε_t	v (m/s)
PVC	0.002	0.066	0.003421194	0.030303	1E-06
PVC	0.002	0.0542	0.002307217	0.0369004	1E-06

B. Resultados

	Velocidad (m/s)	Reynolds	f	Caudal (m³/s)	Caudal (l/s)
Tubería principal	2.8315426	186322.840	0.057512842	0.0096873	9.68726
Cola tubería	4.1986763	226887.591	0.062474077		

b. Cálculos en tubería Ø3"

A. Datos

a. **Altura** = 6.15 m

b. **Tubería Principal**

	Longitud Horizontal (m)	Longitud Vertical (m)	Total (m)
Ø3"	2.5	5.5	8

c. **Cola de Tubería**

	Lc (m)
Ø2½"	0.35

d. **Coefficientes de perdidas de carga locales**

Datos para el estrechamiento y ensanchamiento

	d1 (m)	d2 (m)	β	θ°
Reducción/aumento	0.066	0.0801	0.823970037	58

Valores de K para perdidas de carga locales

Elemento	Cantidad	K	Total K
Reducción	1	0.227400554	0.2274006
Aumento	1	0.223646917	0.2236469
Sumidero	1	2	2
Codo 45°	2	16f	32f
Codo 90°	1	30f	30f

e. **Datos físicos**

	ε (m)	Din (m)	Area (m²)	ε_t	v (m/s)
PVC	0.002	0.0801	0.005039122	0.0249688	1E-06
PVC	0.002	0.066	0.003421194	0.030303	1E-06

B. Resultados

	Velocidad (m/s)	Reynolds	f	Caudal (m³/s)	Caudal (l/s)
Tubería principal	3.0641739	244706.214	0.053134315	0.0154407	15.4407
Cola tubería	4.5132623	296984.36	0.057451887		

c. Cálculos en tubería Ø4"

A. Datos

a. **Altura** = 6.15 m

b. **Tubería Principal**

	Longitud Horizontal (m)	Longitud Vertical (m)	Total (m)
Ø4"	2.5	5.5	8

c. **Cola de Tubería**

	Lc (m)
Ø3"	0.35

d. **Coefficientes de pérdidas de carga locales**

Datos para el estrechamiento y ensanchamiento

	d1 (m)	d2 (m)	β	θ°
Reducción/aumento	0.0801	0.1032	0.776162791	58

Valores de K para pérdidas de carga locales

Elemento	Cantidad	K	Total K
Reducción	1	0.35763225	0.3576323
Aumento	1	0.435530752	0.4355308
Sumidero	1	2	2
Codo 45°	2	16f	32f
Codo 90°	1	30f	30f

e. **Datos físicos**

	ε (m)	Din (m)	Area (m²)	εt	v (m/s)
PVC	0.002	0.1032	0.008364679	0.0193798	1E-06
PVC	0.002	0.0801	0.005039122	0.0249688	1E-06

B. Resultados

	Velocidad (m/s)	Reynolds	f	Caudal (m³/s)	Caudal (l/s)
Tubería principal	3.2670304	336149.087	0.048125362	0.0273277	27.3277
Cola tubería	5.423099	433090.958	0.053073536		

d. Cálculos en tubería Ø6"

A. Datos

a. Altura = 6.15 m

b. Tubería Principal

	Longitud Horizontal (m)	Longitud Vertical (m)	Total (m)
Ø4"	2.5	5.5	8

c. Cola de Tubería

	Lc (m)
Ø3"	0.35

d. Coeficientes de pérdidas de carga locales

Datos para el estrechamiento y ensanchamiento

	d1 (m)	d2 (m)	β	θ°
Reducción/aumento	0.1032	0.152	0.678947368	58

Valores de K para pérdidas de carga locales

Elemento	Cantidad	K	Total K
Reducción	1	0.828136218	0.8281362
Aumento	1	1.367357871	1.3673579
Sumidero	1	2	2
Codo 45°	2	16f	32f
Codo 90°	1	30f	30f

e. Datos físicos

	ε (m)	Din (m)	Area (m ²)	ε_t	v (m/s)
PVC	0.002	0.152	0.018145839	0.0131579	1E-06
PVC	0.002	0.1032	0.008364679	0.0193798	1E-06

B. Resultados

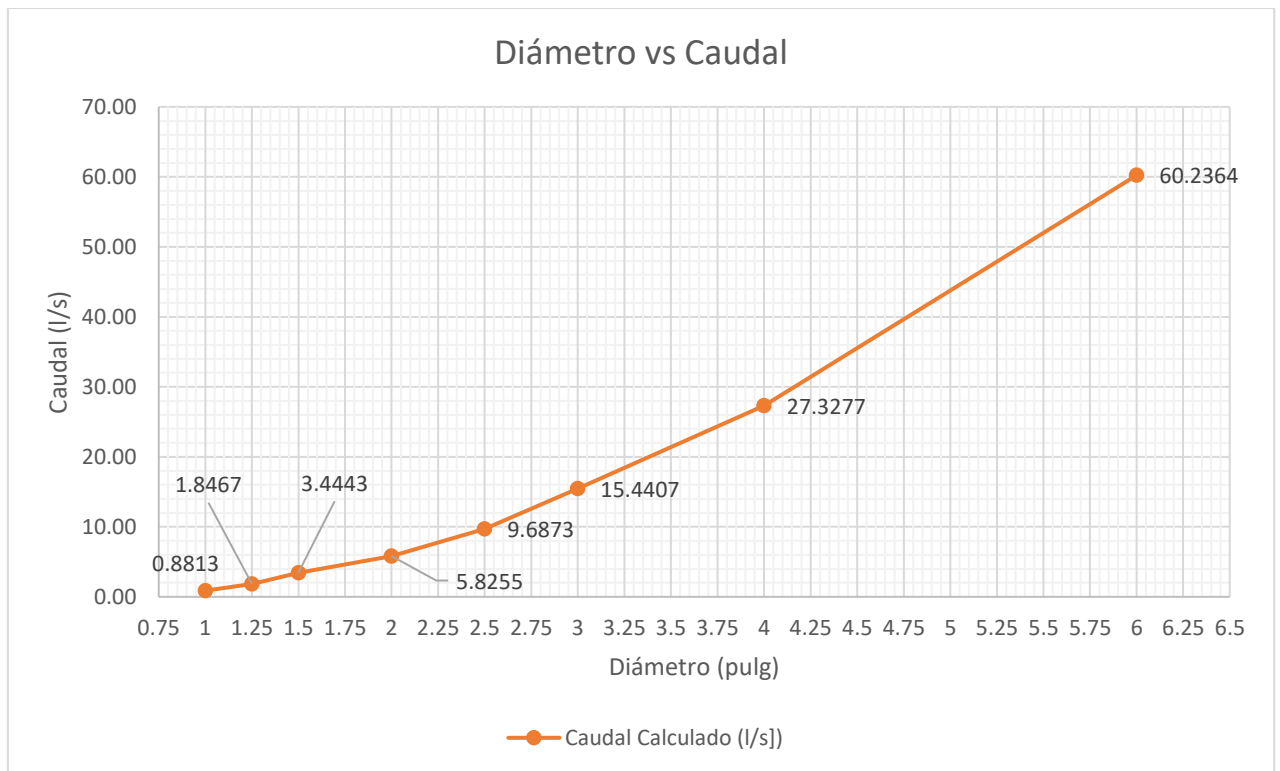
	Velocidad (m/s)	Reynolds	f	Caudal (m ³ /s)	Caudal (l/s)
Tubería principal	3.3195709	503065.576	0.041744422	0.0602364	60.2364
Cola tubería	7.2012805	740949.299	0.048060484		

Con los datos de los caudales de los diámetros de Ø2½", Ø3", Ø4" y 6" se completa el grafico con los datos hallados en el capítulo anterior

Para el caudal se tiene:

Diámetro (pulg)	1	1.25	1.5	2	2.5	3	4	6
Caudal Calculado (l/s)	0.8813	1.8467	3.4443	5.8255	9.6873	15.4407	27.3277	60.2364

Resultados caudal

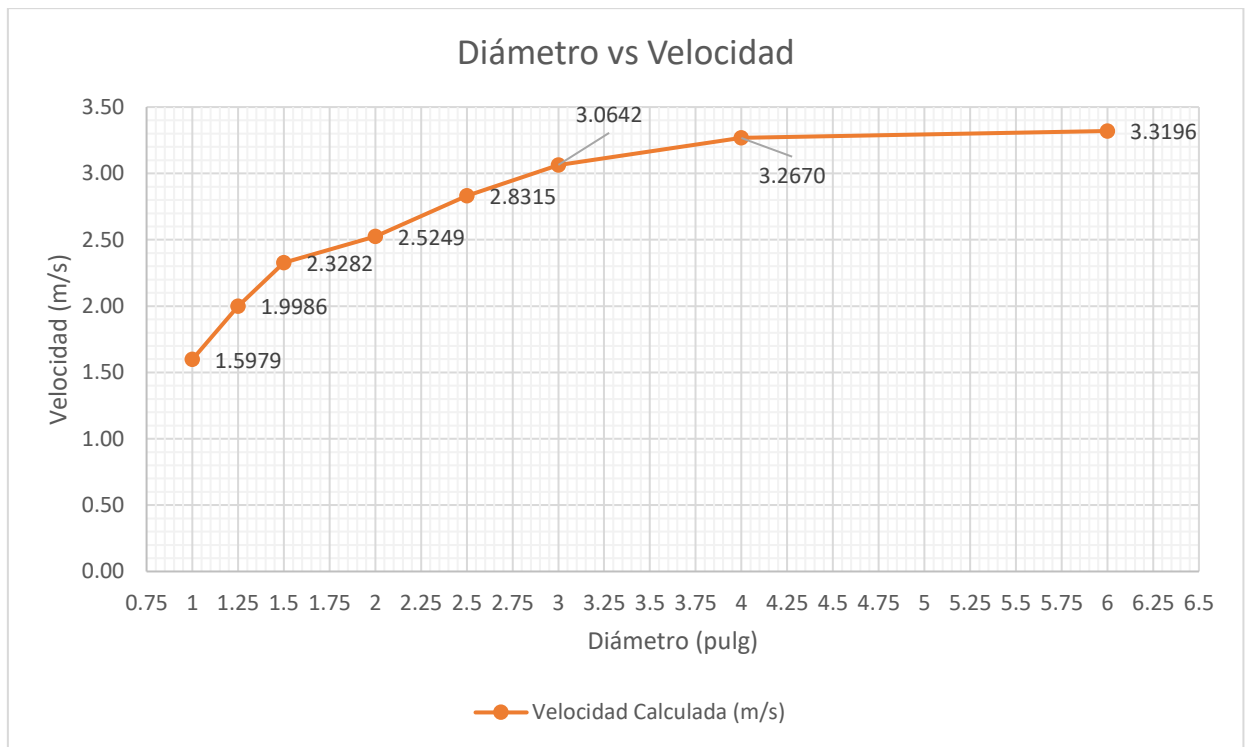


Diámetro vs Caudal

Para la velocidad se tiene:

Diámetro	Ø1"	Ø1¼"	Ø1½"	Ø2"	Ø2½"	Ø3"	Ø4"	Ø6"
Velocidad Calculada (m/s)	1.5979	1.9986	2.3282	2.5249	2.8315	3.0642	3.2670	3.3196

Resultados de velocidades



Diámetro vs Velocidad

Anexo 2: Comparación con datos extraídos de la norma NTS 110,113 y 119

En el presente anexo se realizará una comparación de los datos dados por la norma con los resultados de la presente tesis. Los resultados que se presentaran a continuación son para sistemas de drenaje sifónico de una sola bajante tal como se ha detallado en la experimentación de la presente investigación.

Las NTS (Norma Técnica de Salud) es una de las referencias normativas para el diseño pluvial dirigido a Hospitales en el Perú. De esta norma se puede extraer la siguiente información con respecto a las tuberías verticales o montantes.

Diámetro de la Montante	Intensidad de lluvia mm/h					
	50	75	100	125	150	200
	Metros cuadrados de área servida (proyección horizontal)					
2"	130	85	65	50	40	30
2½"	240	160	120	95	80	60
3"	400	270	200	160	135	100
4"	850	570	425	340	285	210
5"			800	640	535	400
6"					835	625

Montantes de agua de lluvia (m² Área Servida) para intensidades de lluvia en mm/h.

Fuente: NTS 110

De la tabla A.3 se muestra los metros cuadrados de cobertura para determinado diámetro e intensidad. El cálculo del caudal correspondiente para una intensidad y área se expresa con la siguiente ecuación.

$$Q = 0.278iCA$$

Donde:

$$Q = \text{Caudal pico en m}^3/\text{s}$$

$$i = \text{Intensidad de la lluvia en mm/hora}$$

$$A = \text{Area de drenaje en km}^2$$

$$C = \text{Coeficiente de escorrentía}$$

Sabiendo lo anterior se puede elaborar un cuadro con los diámetros analizados en la presente investigación y sus caudales óptimos hallados

Sabiendo que:

Diámetro	Caudal Calculado MAX (l/s)
1	0.881
1 1/4	1.847
1 1/2	3.444
2	5.825
2 1/2	9.687
3	15.441
4	27.328
6	60.236

Caudales óptimos hallados en la presente investigación

Usando la ecuación A.1 para hallar el área de drenaje en m² con un coeficiente de escorrentía de 0.88 para techos (según la Tabla 1.a del la Norma CE.040 del Reglamento Nacional de Edificaciones) y un caudal correspondiente a los mencionados en la tabla A.4 se obtiene los siguientes resultados:

Diámetro de la Montante	Intensidad de Lluvias (mm/h)					
	50	75	100	125	150	200
	Metros cuadrados de área servida (proyección horizontal)					
1"	72.05	48.03	36.03	28.82	24.02	18.01
1 1/4"	150.98	100.65	75.49	60.39	50.33	37.74
1 1/2"	281.58	187.72	140.79	112.63	93.86	70.39
2"	476.25	317.50	238.12	190.50	158.75	119.06
2 1/2"	791.96	527.97	395.98	316.78	263.99	197.99
3"	1262.32	841.55	631.16	504.93	420.77	315.58
4"	2234.11	1489.41	1117.06	893.64	744.70	558.53
6"	4924.49	3283.00	2462.25	1969.80	1641.50	1231.12

Áreas de drenaje usando drenaje sifónico para montantes

La NTS también menciona área de drenaje con respecto a las tuberías horizontales lo cual lo presenta en la siguiente tabla.

Diámetro del Conducto	Intensidad de Lluvias (mm/h) Pendiente 1%					Intensidad de Lluvias (mm/h) Pendiente 2%				
	50	75	100	125	150	50	75	100	125	150
	Metros cuadrados de área servida (proyección horizontal)									
3"	150	100	75	60	50	215	140	105	85	70
4"	345	230	170	135	115	490	325	245	135	160
5"	620	410	310	245	205	875	580	435	350	290
6"	990	660	495	395	330	1400	935	700	560	465
8"	2100	1425	1065	855	705	3025	2015	1510	1210	1005

Conductos horizontales para aguas de lluvia

Fuente: NTS 110

Usando nuevamente la ecuación A.1 para hallar el área de drenaje en m² con un coeficiente de escorrentía de 0.88 para techos (según la Tabla 1.a del la Norma CE.040 del Reglamento Nacional de Edificaciones) y un caudal correspondiente a los mencionados en la tabla A.4 se obtiene los siguientes resultados:

Diámetro del Conducto	Intensidad de Lluvias (mm/h) - PENDIENTE 0%				
	50	75	100	125	150
	Metros cuadrados de área servida (proyección horizontal)				
1"	72.05	48.03	36.03	28.82	24.02
1¼"	150.98	100.65	75.49	60.39	50.33
1½"	281.58	187.72	140.79	112.63	93.86
2"	476.25	317.50	238.12	190.50	158.75
2½"	791.96	527.97	395.98	316.78	263.99
3"	1262.32	841.55	631.16	504.93	420.77
4"	2234.11	1489.41	1117.06	893.64	744.70
6"	4924.49	3283.00	2462.25	1969.80	1641.50

Áreas de drenaje usando drenaje sifónico para tuberías horizontales

Es importante mencionar que las tuberías de diámetro de 1" (tanto en montantes como horizontales) en situaciones reales fuera de las condiciones experimentales, según normas europeas, no se recomienda usarlas debido a que son más fáciles de obstruirse y recomiendan un diámetro mínimo de 1¼".

Anexo 3: Desarrollo del código en VBA

En el presente anexo se mostrará y explicará el código elaborado en Visual Basic for Applications para cálculo del caudal óptimo en sistemas de drenaje sifónico por lo cual se usará las ecuaciones halladas en capítulos anteriores. Es importante mencionar que la rutina está conformada de varias funciones que se explicaran a continuación y seguirá la lógica del diagrama de flujo mencionada en el Capítulo IV.

Para un mejor entendimiento se comparte el enlace y código QR del archivo de cálculo en Excel de la presente investigación donde está incluido las funciones que se detallaran a continuación .



https://unipe-my.sharepoint.com/:f/g/personal/jgvasquezp_uni_pe/Esl2PcnsdQNFoUc-7JjhrQ0BOTvz-8pW5CI0D84OI5KaYQ?e=CbyZge

a) Función logaritmo base 10

```
Private Function LogW10(X As Double) As Double
    LogW10 = Log(X) / Log(10)
End Function
```

Esta función nos permite hallar el logaritmo en base 10 a través de la función LogW10(x), esto es debido a que el mismo VBA entiende la función de Log(x) como el logaritmo neperiano. Sin embargo, podemos ayudarnos de la propiedad de cambio de base de logaritmo para desarrollar un logaritmo en base 10.

$$\text{Log}_b(x) = \frac{\text{Log}_a(x)}{\text{Log}_a(b)}$$

b) Función Colebrooke-White con cambio de variable

```
Private Function Gx(X As Double, Re As Double, e As Double)

    Gx = -2 * LogW10((2.51 * X / Re) + e / (3.71)) - X

End Function
```

Se define la función Gx(X, Re, e) el cual depende de x (obtenido con el cambio de variable del coeficiente de fricción f , del número de Reynolds y del coeficiente de rugosidad relativa. La ecuación esta dada por la fórmula de Colebrooke-White visto en el capítulo anterior

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = x$$

c) Derivada de función Colebrooke-White con cambio de variable

```
Private Function Gxd(X As Double, Re As Double, e As Double)

Gxd = (-2 / Log(10)) * (2.51 * 3.71) / (2.51 * X * 3.71 + Re * e) - 1

End Function
```

Con el fin de desarrollar Newton-Raphson se define la función Gxd (X, Re ,e) , derivada de la función Gx. Esta depende de las mismas variables X, Re, e, mencionadas en el punto anterior.

d) Función de Newton-Raphson para hallar el coeficiente de fricción de acuerdo con Colebrooke-White

Con todas las funciones mencionadas anteriormente, se puede ya formular una función para hallar el coeficiente de fricción de acuerdo al método de Newton-Raphson la cual involucra iteraciones, pero se resuelve de una manera rápida y confiable usando la siguiente función en VBA

```

' Función principal que utiliza el método de Newton-Raphson para
encontrar la solución
Function ColebrookNR(Re As Double, e As Double) As Double
    Dim x_nfl As Double
    Dim x_nf As Double
    Dim error_dif As Double
    Dim contador2 As Integer
    Dim tolerancia As Double
    Dim iteracionMax As Integer

    ' Valor inicial desde donde parte el recorrido buscando la
    raíz/solución
    x_nf = 0.1

    ' Inicialización del contador
    contador2 = 0

    ' Margen de error buscado
    tolerancia = 0.00000001

    ' Límite máximo de iteraciones permitidas buscando la
    raíz/solución
    iteracionMax = 32000

    ' Bucle Newton-Raphson
    Do
        ' Método Newton-Raphson
        x_nfl = x_nf - Gx(x_nf, Re, e) / Gxd(x_nf, Re, e)

        ' Calcular la diferencia del error
        error_dif = x_nfl - x_nf

        ' Asignar nuevo valor para la siguiente iteración
        x_nf = x_nfl

        ' Incrementar el contador
        contador2 = contador2 + 1

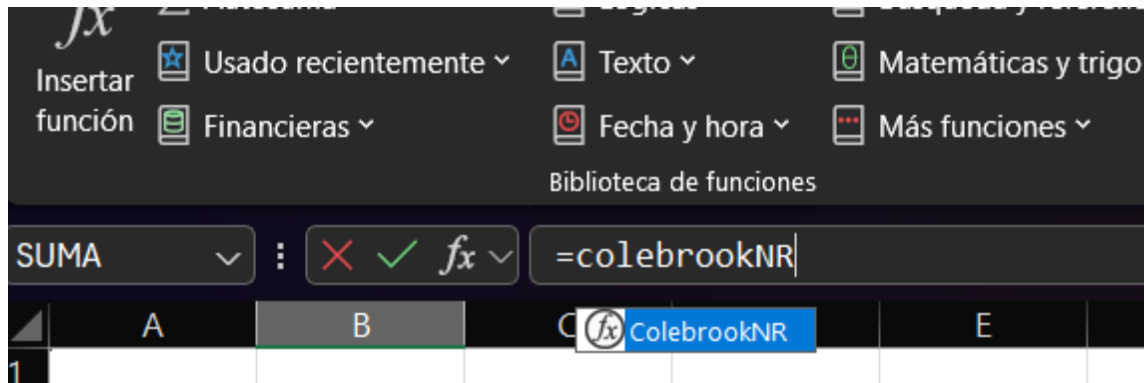
        ' Condición de salida del bucle
        Loop Until (Math.Abs(error_dif) <= tolerancia And x_nfl >
0) Or contador2 = iteracionMax

    ' Resultado final de la función
    ColebrookNR = 1 / (x_nfl) ^ 2

End Function

```

Se comento líneas de función (') para detallar más sobre el proceso que se genera paso por paso. Esta función ha sido llamada "ColebrookNR" la cual tiene como variables Re (Reynolds) y e (coeficiente de rugosidad relativa). A diferencia de las otras funciones esta si se mostrara en una hoja de Excel habilitada para macros



De las cuales deberemos introducir como argumentos de la función al Re y e tal como lo haríamos con cualquier otra función de Excel.

Una vez ya podemos hallar el coeficiente de fricción con la ecuación de Colebrook-White procedemos a hallar el caudal optimo de acuerdo con el diagrama de flujo antes mencionado.

e) Función de velocidad

```
' Función para calcular Ev
Private Function Ev(v As Double, L As Double, Lc As Double, D1
As Double, D2 As Double, f1 As Double, f2 As Double, Kt As
Double, H As Double) As Double
' Función Ev
    Ev = ((v ^ 2) / (2 * 9.81)) * (1 + (f2 * L / D2) + (f1 *
Lc * (D2 ^ 4) / (D1 ^ 5)) + Kt + 30 * f2 + 32 * f1) - H
End Function

' Función para calcular la derivada de Ev
Private Function Evd(v As Double, L As Double, Lc As Double,
D1 As Double, D2 As Double, f1 As Double, f2 As Double, Kt As
Double, H As Double) As Double

' Derivada de la función Ev
    Evd = (v / 9.81) * ((f2 * L / D2) + (f1 * Lc * (D2 ^ 4) /
(D1 ^ 5)) + Kt + 1 + 30 * f2 + 32 * f1)
End Function
```

```

' Función principal para calcular la velocidad usando el
método de Newton-Raphson
Function VELOCIDADSI(L As Double, Lc As Double, D1 As Double,
D2 As Double, Kt As Double, H As Double) As Double
    Dim x_nv1 As Double
    Dim x_nv As Double
    Dim error_dif As Double
    Dim contador1 As Integer
    Dim tolerancia As Double
    Dim iteracionMax As Integer
    Dim Re1_x As Double
    Dim Re2_x As Double
    Dim f1 As Double
    Dim f2 As Double
    Dim v1 As Double

    ' Valor inicial desde donde parte el recorrido buscando la
    raíz/solución
    x_nv = 2

    ' Inicialización del contador
    contador1 = 0

    ' Margen de error buscado
    tolerancia = 0.00000001

    ' Límite máximo de iteraciones permitidas buscando la
    raíz/solución
    iteracionMax = 32000

    ' Bucle Newton-Raphson
    Do
        ' Calcular el valor intermedio v1
        v1 = x_nv * (D2 ^ 2) / (D1 ^ 2)

        ' Llamar a la función de Colebrook para hallar f
        Re2_x = x_nv * D2 / 0.000001003
        Re1_x = v1 * D1 / 0.000001003
        f2 = ColebrookNR(Re2_x, 0.002 / D2)
        f1 = ColebrookNR(Re1_x, 0.002 / D1)

        ' Método Newton-Raphson para calcular la velocidad
        x_nv1 = x_nv - Ev(x_nv, L, Lc, D1, D2, f1, f2, Kt, H)
        / Evd(x_nv, L, Lc, D1, D2, f1, f2, Kt, H)
    
```

```

' Calcular la diferencia del error
error_dif = x_nv1 - x_nv

' Asignar nuevo valor para la siguiente iteración
x_nv = x_nv1

' Incrementar el contador
contador1 = contador1 + 1
'MsgBox f1 & "---" & f2 & "---" & x_nv1
' Condición de salida del bucle
Loop Until (Math.Abs(error_dif) <= tolerancia And x_nv1 >
0) Or contador1 = iteracionMax

' Resultado final de la función
VELOCIDADSIFF = x_nv1

' Mostrar el número de iteraciones (opcional)
'MsgBox contador1 & "---" & v1 & "---" & f1

End Function

```

Estas rutinas nos permiten usar las funciones COLEBOOKNR y VELOCIDADSIFF dentro de Excel. La primera nos permite hallar el coeficiente f y la segunda nos permite hallar la velocidad que nos dará el caudal óptimo.

Los parámetros para ingresar en las funciones serán las siguientes:

- Función COLEBROOKNR

=COLEBROOKNR(Re; e)

Donde:

Re: Numero de Reynolds

e: Coeficiente de rozamiento relativo

- Función VELOCIDADSIFF

=VELOCIDADSIFF (L; Lc; D1; D2; Kt; H)

Donde:

L : Longitud total de tubería principal

L_c : Longitud de cola de tubería

D_1 : Diámetro de cola de tubería

D_2 : Diámetro de la tubería principal

kt : Sumatoria de coeficientes de pérdida local

H : Altura del sistema desde sumidero hasta descarga

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled "CALCULO.xlsm" with the following sections:

- a. Altura**: Input field with value 6.15 m.
- b. Tubería Principal**: Table with columns: Longitud Horizontal, Longitud Vertical, Total. Values: 2.5, 5.5, 8.
- c. Cola de Tubería**: Table with columns: Longitud Horizontal, Longitud Vertical, Total. Values: 0.48, 0.48, 0.96.
- d. Coeficientes de pérdidas de carga locales**: Table with columns: Reducción/Aumento, d1, d2, K, g. Values: 0.043, 0.0542, 0.79336, 57.
- e. Datos físicos**: Table with columns: E, Din, Area, E_t, D. Values: 0.002, 0.0542, 0.00231, 0.0369, 1E-06.
- B. Resultados**: Table with columns: Velocidad (m/s), Reynolds, f, Caudal (m³/s), Caudal (l/s). Values: 4.01478, 171977.6091, 0.06926, 0.005825, 5.825473.

Blue arrows indicate the flow of data from the input sections to the results table.

Uso del código dentro de Excel

Anexo 4: Análisis detallado del cálculo iterativo

En este anexo se elaborará un cálculo detallado de las operaciones que realiza el programa en VBA. Esto es realizado en cuadros y fórmulas de Excel con el fin de tener una comprobación al resultado que da el programa.

a. Cálculos iterativos en tubería Ø2"

Datos físicos

		ϵ	Din	Area	ϵ_t	ν
Principal	PVC	0.002	0.0542	0.0023	0.0369	1E-06
Cola Tub	PVC	0.002	0.043	0.0015	0.04651	1E-06

Altura = 6.15 m

Tubería Principal

Ø2"	Longitud Horizontal	Longitud Vertical	Total
	2.5	5.5	8

Cola de Tubería

Ø1½"	Lc
	0.48

K = 2.649846 + 30f₂+32f₁

v₀ = 2 (Velocidad inicial sumida)

ITERACIÓN VELOCIDAD N°1

x₀ = 0.1 tolerancia = 0.00000001

Hallando f₂.

N° Iteración	v ₀	x _n	Re	G _x	G' _x	x _{n+1}	Error	¿Cumple?
--------------	----------------	----------------	----	----------------	-----------------	------------------	-------	----------

1	2	0.1000	108076	3.904484	-1.002	3.996583	3.896583	NO
2		3.9966	108076	3.57E-05	-1.002	3.996618	0.00004	NO
3		3.9966	108076	0	-1.002	3.996618	0	SI

$$x = 3.996618$$

$$f2 = 0.062606$$

Hallando f1.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
4	3.178	0.1000	136226	3.703497	-1.0013	3.798776	3.698776	NO
5		3.7988	136226	1.28E-05	-1.0013	3.798789	1.28E-05	NO
6		3.7988	136226	0	-1.0013	3.798789	0	SI

$$x = 3.798789$$

$$f1 = 0.069296$$

Se halla velocidad de la bajante principal (diametro mayor)

Nº Iteración	xn	L	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
1	2	8	-2.28888	3.86112	2.592803	0.592803	NO

ITERACIÓN VELOCIDAD Nº2

$$x1 = 0.1 \quad \text{tolerancia} = 0.00000001$$

Hallando f2.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
7	2.593	0.1000	140110	3.90453	-1.0016	3.998432	3.898432	NO
8		3.9984	140110	2.13E-05	-1.0016	3.998453	0.00002	NO
9		3.9985	140110	0	-1.0016	3.998453	0	SI

$$x = 3.998453$$

$$f2 = 0.062548$$

Hallando f1.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
10	4.119	0.1000	176603	3.703526	-1.001	3.799883	3.699883	NO
11		3.7999	176603	7.62E-06	-1.001	3.799891	7.61E-06	NO
12		3.7999	176603	0	-1.001	3.799891	0	SI

$$x = 3.799891$$

$$f1 = 0.069256$$

Se halla velocidad de la bajante principal (diametro mayor)

Nº Iteración	xn	L	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
2	2.5928	8	0.334889	5.00222	2.525855	0.066948	NO

ITERACIÓN VELOCIDAD Nº3

$$x2 = 0.1 \quad \text{tolerancia} = 0.00000001$$

Hallando f2.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
13	2.526	0.1000	136492	3.904526	-1.0016	3.998267	3.898267	NO
14		3.9983	136492	2.24E-05	-1.0016	3.998289	0.00002	NO
15		3.9983	136492	0	-1.0016	3.998289	0	SI

$$x = 3.998289$$

$$f2 = 0.062554$$

Hallando f1.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
16	4.013	0.1000	172043	3.703524	-1.001	3.799784	3.699784	NO
17		3.7998	172043	8.03E-06	-1.001	3.799792	8.02E-06	NO
18		3.7998	172043	0	-1.001	3.799792	0	SI

$$x = 3.799792$$

$$f1 = 0.069260$$

Se halla velocidad de la bajante principal (diametro mayor)

Nº Iteración	xn	L	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
3	2.5259	8	0.004691	4.87335	2.524893	0.000963	NO

ITERACIÓN VELOCIDAD Nº4

x3 = 0.1 tolerancia = 0.00000001

Hallando f2.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
19	2.525	0.1000	136440	3.904526	-1.0016	3.998264	3.898264	NO
20		3.9983	136440	2.25E-05	-1.0016	3.998287	0.00002	NO
21		3.9983	136440	0	-1.0016	3.998287	0	SI

$$x = 3.998287$$

$$f2 = 0.062554$$

Hallando f1.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
22	4.011	0.1000	171978	3.703524	-1.001	3.799783	3.699783	NO
23		3.7998	171978	8.03E-06	-1.001	3.799791	8.02E-06	NO
24		3.7998	171978	0	-1.001	3.799791	0	SI

$$x = 3.799791$$

$$f1 = 0.069260$$

Se halla velocidad de la bajante principal (diametro mayor)

Nº Iteración	xn	L	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
4	2.5249	8	6.31E-06	4.8715	2.524892	1.3E-06	NO

ITERACIÓN VELOCIDAD Nº5

x4 = 0.1 tolerancia = 0.00000001

Hallando f2.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
25	2.525	0.1000	136440	3.904526	-1.0016	3.998264	3.898264	NO
26		3.9983	136440	2.25E-05	-1.0016	3.998287	0.00002	NO
27		3.9983	136440	0	-1.0016	3.998287	0	SI

x	=	3.998287
---	---	----------

f2	=	0.062554
----	---	----------

Hallando f1.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
28	4.011	0.1000	171978	3.703524	-1.001	3.799783	3.699783	NO
29		3.7998	171978	8.03E-06	-1.001	3.799791	8.02E-06	NO
30		3.7998	171978	0	-1.001	3.799791	0	SI

x	=	3.799791
---	---	----------

f1	=	0.069260
----	---	----------

Se halla velocidad de la bajante principal (diametro mayor)

Nº Iteración	xn	L	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
5	2.5249	8	7.3E-09	4.8715	2.524892	1.5E-09	SI

v	=	2.524892
---	---	----------

Se halla caudal de la bajante principal (diametro mayor)

Q	=	0.005825 m ³ /s
Q	=	5.825473 l/s

b. Cálculos iterativos en tubería Ø1½"

Datos físicos

		ϵ	Din	Area	ϵ_t	ν
Principal	PVC	0.002	0.0434	0.0015	0.04608	1E-06
Cola Tub	PVC	0.002	0.039	0.0012	0.05128	1E-06

Altura = 6.15 m

Tuberia Principal

Ø2"	Longitud Horizontal	Longitud Vertical	Total
	2.5	5.5	8

Cola de Tubería

Ø1½"	Lc
	0.3

K = 3.280264 + 30f₂+32f₁

v₀ = 2 (Velocidad inicial sumida)

ITERACIÓN VELOCIDAD N°1

x₀ = 0.1 tolerancia = 0.00000001

Hallando f₂.

N° Iteración	v ₀	x _n	Re	G _x	G' _x	x _{n+1}	Error	¿Cumple?
1	2	0.1000	86540	3.711464	-1.002	3.803954	3.703954	NO
2		3.8040	86540	3.23E-05	-1.002	3.803986	0.00003	NO
3		3.8040	86540	0	-1.002	3.803986	0	SI

x = 3.803986

f₂ = 0.069107

Hallando f1.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
4	2.477	0.1000	96304	3.618653	-1.0016	3.712738	3.612738	NO
5		3.7127	96304	2.01E-05	-1.0016	3.712758	2E-05	NO
6		3.7128	96304	0	-1.0016	3.712758	0	SI

$$x = 3.712758$$

$$f1 = 0.072545$$

Se halla velocidad de la bajante principal (diametro mayor)

Nº Iteración	xn	L	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
1	2	8	-1.60987	4.54013	2.354588	0.354588	NO

ITERACIÓN VELOCIDAD Nº2

$$x1 = 0.1 \quad \text{tolerancia} = 0.00000001$$

Hallando f2.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
7	2.355	0.1000	101883	3.711495	-1.0017	3.805113	3.705113	NO
8		3.8051	101883	2.33E-05	-1.0017	3.805137	0.00002	NO
9		3.8051	101883	0	-1.0017	3.805137	0	SI

$$x = 3.805137$$

$$f2 = 0.069065$$

Hallando f1.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
10	2.916	0.1000	113378	3.618678	-1.0014	3.713652	3.613652	NO
11		3.7137	113378	1.45E-05	-1.0014	3.713666	1.45E-05	NO
12		3.7137	113378	0	-1.0014	3.713666	0	SI

$$x = 3.713666$$

$$f1 = 0.072509$$

Se halla velocidad de la bajante principal (diametro mayor)

Nº Iteración	xn	L	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
2	2.3546	8	0.139741	5.34254	2.328432	0.026156	NO

ITERACIÓN VELOCIDAD Nº3

$$x2 = 0.1 \quad \text{tolerancia} = 0.00000001$$

Hallando f2.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
13	2.328	0.1000	100752	3.711493	-1.0017	3.80504	3.70504	NO
14		3.8050	100752	2.39E-05	-1.0017	3.805064	0.00002	NO
15		3.8051	100752	0	-1.0017	3.805064	0	SI

$$x = 3.805064$$

$$f2 = 0.069068$$

Hallando f1.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
16	2.883	0.1000	112119	3.618676	-1.0014	3.713594	3.613594	NO
17		3.7136	112119	1.48E-05	-1.0014	3.713609	1.48E-05	NO
18		3.7136	112119	0	-1.0014	3.713609	0	SI

$$x = 3.713609$$

$$f1 = 0.072512$$

Se halla velocidad de la bajante principal (diametro mayor)

Nº Iteración	xn	L	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
3	2.3284	8	0.00096	5.28335	2.32825	0.000182	NO

ITERACIÓN VELOCIDAD Nº4

$$x3 = 0.1 \quad \text{tolerancia} = 0.00000001$$

Hallando f2.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
19	2.328	0.1000	100744	3.711493	-1.0017	3.805039	3.705039	NO
20		3.8050	100744	2.39E-05	-1.0017	3.805063	0.00002	NO
21		3.8051	100744	0	-1.0017	3.805063	0	SI

$$x = 3.805063$$

$$f2 = 0.069068$$

Hallando f1.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
22	2.883	0.1000	112110	3.618676	-1.0014	3.713593	3.613593	NO
23		3.7136	112110	1.48E-05	-1.0014	3.713608	1.48E-05	NO
24		3.7136	112110	0	-1.0014	3.713608	0	SI

$$x = 3.713608$$

$$f1 = 0.072512$$

Se halla velocidad de la bajante principal (diametro mayor)

Nº Iteración	xn	L	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
4	2.3283	8	1.33E-06	5.28294	2.32825	2.52E-07	NO

ITERACIÓN VELOCIDAD Nº5

$$x4 = 0.1 \quad \text{tolerancia} = 0.00000001$$

Hallando f2.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
25	2.328	0.1000	100744	3.711493	-1.0017	3.805039	3.705039	NO
26		3.8050	100744	2.39E-05	-1.0017	3.805063	0.00002	NO
27		3.8051	100744	0	-1.0017	3.805063	0	SI

$$x = 3.805063$$

f_2	=	0.069068
-------	---	----------

Hallando f_1 .

Nº Iteración	v_0	x_n	Re	G_x	G'_x	x_{n+1}	Error	¿Cumple?
28	2.883	0.1000	112110	3.618676	-1.0014	3.713593	3.613593	NO
29		3.7136	112110	1.48E-05	-1.0014	3.713608	1.48E-05	NO
30		3.7136	112110	0	-1.0014	3.713608	0	SI

x	=	3.713608
-----	---	----------

f_1	=	0.072512
-------	---	----------

Se halla velocidad de la bajante principal (diámetro mayor)

Nº Iteración	x_n	L	G_x	G'_x	x_{n+1}	Error	¿Cumple?
5	2.3282	8	1.79E-09	5.28294	2.32825	3.39E-10	SI

v	=	2.328250
-----	---	----------

Se halla caudal de la bajante principal (diámetro mayor)

Q	=	0.003444 m^3/s
Q	=	3.444284 l/s

c. Cálculos iterativos en tubería Ø1¼"

Datos físicos

		ϵ	Din	Area	ϵt	ν
Principal	PVC	0.002	0.0343	0.0009	0.05831	1E-06
Cola Tub	PVC	0.002	0.0265	0.0006	0.07547	1E-06

Altura = 6.15 m

Tuberia Principal

Ø1¼"	Longitud Horizontal	Longitud Vertical	Total
	2.5	5.5	8

Cola de Tubería

Ø1"	Lc
	0.35

$K = 2.847663 + 30f_2 + 32f_1$

$v_0 = 2$ (Velocidad inicial sumida)

ITERACIÓN VELOCIDAD N°1

$x_0 = 0.1$ tolerancia = 0.00000001

Hallando f_2 .

N° Iteración	v_0	x_n	Re	Gx	G'x	x_{n+1}	Error	¿Cumple?
1	2	0.1000	68395	3.507073	-1.002	3.599976	3.499976	NO
2		3.6000	68395	2.88E-05	-1.002	3.600005	0.00003	NO
3		3.6000	68395	0	-1.002	3.600005	0	SI

$x = 3.600005$

$f_2 = 0.077160$

Hallando f_1 .

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
4	3.351	0.1000	88526	3.283059	-1.0012	3.379089	3.279089	NO
5		3.3791	88526	9.04E-06	-1.0012	3.379098	9.03E-06	NO
6		3.3791	88526	0	-1.0012	3.379098	0	SI

$$x = 3.379098$$

$$f1 = 0.087579$$

Se halla velocidad de la bajante principal (diámetro mayor)

Nº Iteración	xn	L	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
1	2	8	0.008622	6.15862	1.9986	0.0014	NO

ITERACIÓN VELOCIDAD Nº2

$$x1 = 0.1 \quad \text{tolerancia} = 0.00000001$$

Hallando f2.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
7	1.999	0.1000	68347	3.507073	-1.002	3.599971	3.499971	NO
8		3.6000	68347	2.89E-05	-1.002	3.6	0.00003	NO
9		3.6000	68347	0	-1.002	3.6	0	SI

$$x = 3.6$$

$$f2 = 0.077160$$

Hallando f1.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
10	3.348	0.1000	88464	3.283058	-1.0012	3.379086	3.279086	NO
11		3.3791	88464	9.05E-06	-1.0012	3.379096	9.04E-06	NO
12		3.3791	88464	0	-1.0012	3.379096	0	SI

$$x = 3.379096$$

$$f1 = 0.087579$$

Se halla velocidad de la bajante principal (diámetro mayor)

Nº Iteración	xn	L	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
2	1.9986	8	1.67E-05	6.15432	1.998597	2.72E-06	NO

ITERACIÓN VELOCIDAD Nº3

x2 = 0.1 tolerancia = 0.00000001

Hallando f2.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
13	1.999	0.1000	68347	3.507073	-1.002	3.599971	3.499971	NO
14		3.6000	68347	2.89E-05	-1.002	3.6	0.00003	NO
15		3.6000	68347	0	-1.002	3.6	0	SI

x = 3.6

f2 = 0.077160

Hallando f1.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
16	3.348	0.1000	88464	3.283058	-1.0012	3.379086	3.279086	NO
17		3.3791	88464	9.05E-06	-1.0012	3.379096	9.04E-06	NO
18		3.3791	88464	0	-1.0012	3.379096	0	SI

x = 3.379096

f1 = 0.087579

Se halla velocidad de la bajante principal (diametro mayor)

Nº Iteración	xn	L	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
3	1.9986	8	2.66E-08	6.15432	1.998597	4.33E-09	SI

ITERACIÓN VELOCIDAD Nº4

x3 = 0.1 tolerancia = 0.00000001

Hallando f2.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
19	1.999	0.1000	68347	3.507073	-1.002	3.599971	3.499971	NO
20		3.6000	68347	2.89E-05	-1.002	3.6	0.00003	NO
21		3.6000	68347	0	-1.002	3.6	0	SI

x	=	3.6
---	---	-----

f2	=	0.077160
----	---	----------

Hallando f1.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
22	3.348	0.1000	88464	3.283058	-1.0012	3.379086	3.279086	NO
23		3.3791	88464	9.05E-06	-1.0012	3.379096	9.04E-06	NO
24		3.3791	88464	0	-1.0012	3.379096	0	SI

x	=	3.379096
---	---	----------

f1	=	0.087579
----	---	----------

Se halla velocidad de la bajante principal (diametro mayor)

Nº Iteración	xn	L	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
4	1.9986	8	4.24E-11	6.15432	1.998597	6.89E-12	SI

Se halla caudal de la bajante principal (diametro mayor)

Q	=	0.001847 m ³ /s
Q	=	1.84673 l/s

d. Cálculos iterativos en tubería Ø1"

Datos físicos

		ϵ	Din	Area	ϵ_t	v
Principal	PVC	0.002	0.0265	0.0006	0.07547	1E-06
Cola Tub	PVC	0.002	0.0181	0.0003	0.1105	1E-06

Altura = 6.15 m

Tubería Principal

Ø1"	Longitud Horizontal	Longitud Vertical	Total
	2.5	5.5	8

Cola de Tubería

Ø3/4"	Lc
	0.35

$K = 3.280264 + 30f_2 + 32f_1$

$v_0 = 2$ (Velocidad inicial sumida)

ITERACIÓN VELOCIDAD N°1

$x_0 = 0.1$ tolerancia = 0.00000001

Hallando f_2 .

N° Iteración	v_0	x_n	Re	G_x	G'_x	x_{n+1}	Error	¿Cumple?
1	2	0.1000	52841	3.282977	-1.002	3.376333	3.276333	NO
2		3.3763	52841	2.53E-05	-1.002	3.376359	0.00003	NO
3		3.3764	52841	0	-1.002	3.376359	0	SI

$x = 3.376359$

$f_2 = 0.087721$

Hallando f1.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
4	4.287	0.1000	77365	2.95195	-1.0009	3.04916	2.94916	NO
5		3.0492	77365	4.47E-06	-1.0009	3.049165	4.47E-06	NO
6		3.0492	77365	0	-1.0009	3.049165	0	SI

$$x = 3.049165$$

$$f1 = 0.107557$$

Se halla velocidad de la bajante principal (diametro mayor)

Nº Iteración	xn	L	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
1	2	8	3.308091	9.45809	1.650237	0.349763	NO

ITERACIÓN VELOCIDAD Nº2

$$x1 = 0.1 \quad \text{tolerancia} = 0.00000001$$

Hallando f2.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
7	1.65	0.1000	43600	3.282934	-1.0025	3.374886	3.274886	NO
8		3.3749	43600	3.71E-05	-1.0024	3.374923	0.00004	NO
9		3.3749	43600	4.44E-15	-1.0024	3.374923	4.44E-15	SI

$$x = 3.374923$$

$$f2 = 0.087795$$

Hallando f1.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
10	3.537	0.1000	63835	2.95193	-1.0011	3.04855	2.94855	NO
11		3.0485	63835	6.56E-06	-1.0011	3.048556	6.55E-06	NO
12		3.0486	63835	0	-1.0011	3.048556	0	SI

$$x = 3.048556$$

$$f1 = 0.107600$$

Se halla velocidad de la bajante principal (diametro mayor)

Nº Iteración	xn	L	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
2	1.6502	8	0.29342	7.80908	1.612663	0.037574	NO

ITERACIÓN VELOCIDAD Nº3

$$x2 = 0.1 \quad \text{tolerancia} = 0.00000001$$

Hallando f2.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
13	1.613	0.1000	42608	3.282928	-1.0025	3.374694	3.274694	NO
14		3.3747	42608	3.88E-05	-1.0025	3.374732	0.00004	NO
15		3.3747	42608	5.33E-15	-1.0025	3.374732	5.33E-15	SI

$$x = 3.374732$$

$$f2 = 0.087805$$

Hallando f1.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
16	3.457	0.1000	62381	2.951928	-1.0012	3.048468	2.948468	NO
17		3.0485	62381	6.87E-06	-1.0012	3.048475	6.86E-06	NO
18		3.0485	62381	0	-1.0012	3.048475	0	SI

$$x = 3.048475$$

$$f1 = 0.107606$$

Se halla velocidad de la bajante principal (diametro mayor)

Nº Iteración	xn	L	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
3	1.6127	8	0.003869	7.63194	1.612156	0.000507	NO

ITERACIÓN VELOCIDAD Nº4

$$x3 = 0.1 \quad \text{tolerancia} = 0.00000001$$

Hallando f2.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
19	1.612	0.1000	42594	3.282928	-1.0025	3.374691	3.274691	NO
20		3.3747	42594	3.88E-05	-1.0025	3.37473	0.00004	NO
21		3.3747	42594	5.33E-15	-1.0025	3.37473	5.33E-15	SI

$$x = 3.37473$$

$$f2 = 0.087806$$

Hallando f1.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
22	3.456	0.1000	62362	2.951928	-1.0012	3.048467	2.948467	NO
23		3.0485	62362	6.87E-06	-1.0012	3.048474	6.87E-06	NO
24		3.0485	62362	0	-1.0012	3.048474	0	SI

$$x = 3.048474$$

$$f1 = 0.107606$$

Se halla velocidad de la bajante principal (diametro mayor)

Nº Iteración	xn	L	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
4	1.6122	8	7.91E-06	7.62955	1.612155	1.04E-06	NO

ITERACIÓN VELOCIDAD Nº5

$$x4 = 0.1 \quad \text{tolerancia} = 0.00000001$$

Hallando f2.

Nº Iteración	v0	xn	Re	Gx	G'x	xn+1	Error	¿Cumple?
25	1.612	0.1000	42594	3.282928	-1.0025	3.374691	3.274691	NO
26		3.3747	42594	3.88E-05	-1.0025	3.37473	0.00004	NO
27		3.3747	42594	4.88E-15	-1.0025	3.37473	4.88E-15	SI

$$x = 3.37473$$

f_2	=	0.087806
-------	---	----------

Hallando f_1 .

Nº Iteración	v_0	x_n	Re	Gx	G'x	x_{n+1}	Error	¿Cumple?
28	3.456	0.1000	62362	2.951928	-1.0012	3.048467	2.948467	NO
29		3.0485	62362	6.87E-06	-1.0012	3.048474	6.87E-06	NO
30		3.0485	62362	0	-1.0012	3.048474	0	SI

x	=	3.048474
-----	---	----------

f_1	=	0.107606
-------	---	----------

Se halla velocidad de la bajante principal (diametro mayor)

Nº Iteración	x_n	L	Gx	G'x	x_{n+1}	Error	¿Cumple?
5	1.6122	8	1.49E-08	7.62954	1.612155	1.96E-09	SI

v	=	1.612155
-----	---	----------

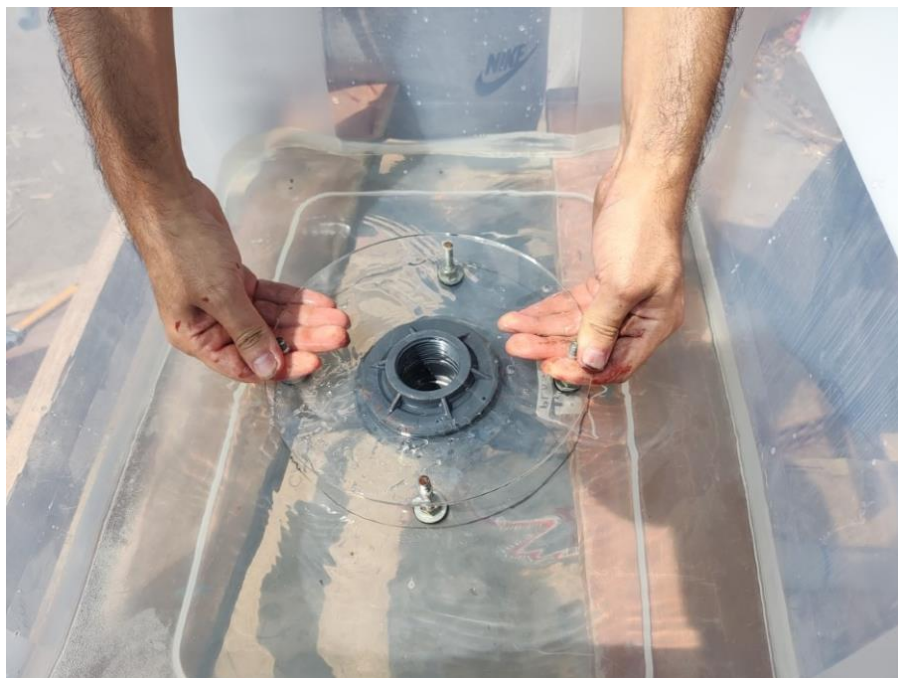
Se halla caudal de la bajante principal (diámetro mayor)

Q	=	0.000889 m ³ /s
Q	=	0.889177 l/s

Anexo 5: Panel fotográfico



Instalación de recipiente con tubería horizontal



Instalación de baffle



Instalación de pernos para baffle



Instalación de empaquetaduras



Sumidero modificado



Descarga un flujo no cebado



Descarga un flujo cebado



Línea desinstalada de Ø2"



Medición de unión en Ø2"



Medicion de altura de recipiente



Vista general al sistema



Llenado de recipiente