



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL FENÓMENO DE CAVITACIÓN EN
SISTEMAS DE CONDUCTOS A PRESIÓN**

Karla Sucely Barrios Fernández

Asesorado por el Ing. Dennis Salvador Argueta Mayorga

Guatemala, agosto de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL FENÓMENO DE CAVITACIÓN
EN SISTEMAS DE CONDUCTOS A PRESIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

KARLA SUCELY BARRIOS FERNÁNDEZ

ASESORADO POR EL ING. DENNIS SALVADOR ARGUETA MAYORGA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, AGOSTO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Mario Estuardo Arriola Avila
EXAMINADOR	Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
EXAMINADOR	Ing. Marco Antonio García Díaz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL FENÓMENO DE CAVITACIÓN EN SISTEMAS DE CONDUCTOS A PRESIÓN

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha Guatemala, 29 de octubre de 2018.



Karla Sucely Barrios Fernández

Guatemala, 23 de abril de 2020

Ingeniero

Pedro Antonio Aguilar Polanco

Jefe del Departamento de Hidráulica

Facultad de Ingeniería

Universidad de San Carlos de Guatemala

Presente

Estimado Ingeniero Aguilar:

Por este medio, me permito informar que, en calidad de asesor nombrado por la dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, he procedido a la revisión final del trabajo de graduación titulado **ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL FENÓMENO DE CAVITACIÓN EN SISTEMAS DE CONDUCTOS A PRESIÓN**, desarrollado por la estudiante universitaria Karla Sucely Barrios Fernández, Carné No. 2015-03663, determinando que el mismo cumple con los requisitos establecidos, por lo que, de la manera más atenta solicito se autorice continuar con los trámites pertinentes para la aprobación final.

Atentamente,



Dennis Salvador Argueta Mayorga
INGENIERO CIVIL
MAESTRO EN INGENIERIA VIAL
MAESTRO EN INGENIERIA SANITARIA
DOCTOR EN CAMBIO CLIMÁTICO Y SOSTENIBILIDAD
COLEGIADO 8297

Dr. MSc. Ing. Dennis Salvador Argueta Mayorga

Asesor

No. de Colegiado: 8297



Guatemala, 24 de abril de 2,020

Ingeniero
Pedro Antonio Aguilar Polanco
Director de Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Aguilar Polanco:

Por este medio me permito manifestar que he revisado el trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL FENÓMENO DE CAVITACIÓN EN SISTEMAS DE CONDUCTOS A PRESIÓN;** desarrollado por la estudiante de Ingeniería Civil **Karla Sucely Barrios Fernández** con CUI 2827 48296 0101 y Registro Académico No. 201503663. Es oportuno mencionar que, en el proceso de elaboración del estudio en cuestión, la estudiante contó con la asesoría del Ing. Dennis Salvador Argueta Mayorga.

Considero este trabajo bien desarrollado, al cumplir con los objetivos fijados, y, los resultados obtenidos representan un aporte para la comunidad del área. Por lo anterior, doy mi aprobación al mismo, y aprovecho para solicitar la continuidad del trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa
Revisor del Departamento de Hidráulica

/mrrm.





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala, 08 de mayo de 2020
DEIC-TG-EIC-001-2020/paap

El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ingeniero Dennis Salvador Argueta Mayorga y del revisor del Departamento de Hidráulica Ingeniero Rafael Enrique Morales Ochoa al trabajo de graduación de la estudiante Karla Sucely Barrios Fernández **ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL FENÓMENO DE CAVITACIÓN EN SISTEMAS DE CONDUCTOS A PRESIÓN** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Director Escuela Ingeniería Civil



Interesado
Asesor
Jefe del Departamento de Hidráulica

Más de 140 años de Trabajo y Mejora Continua



DTG. 399.2020.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL FENÓMENO DE CAVITACIÓN EN SISTEMAS DE CONDUCTOS A PRESIÓN**, presentado por la estudiante universitaria: **Karla Sucely Barrios Fernández**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, noviembre de 2020

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme la sabiduría y fortaleza a lo largo de mi carrera para no rendirme ante los obstáculos, y por bendecirme con las personas que me rodean y me apoyan siempre.
- Virgen María** Por siempre cuidarme y protegerme en mi vida, por brindarme una maravillosa madre, una hermana y un padre como guía.
- Mi madre** Vilma Fernández Hernández, por ser la luz en mi vida, la guía y fortaleza para lograr todo lo que me propongo.
- Mi hermana** Brenda Edith Marisol Barrios Fernández, por ser mi compañera de vida, quien me apoya incondicionalmente y me aconseja en la vida.
- Mi padre** Luis Fernando Barrera, por quererme, enseñarme y guiarme para ser mejor persona cada día.

AGRADECIMIENTOS A:

- Universidad de San Carlos de Guatemala** Por ser mi segunda casa de estudios, la cual me acogió y brindó los conocimientos fundamentales para iniciar con mi vida profesional dentro de Guatemala.
- Mis colegas** Por todo el conocimiento y las experiencias compartidas; gracias a Carlos Gamboa, Douglas Castillo, Edith Pineda, Christopher Guerrero, Sergio Paz, Guadalupe Rivera, Hugo Alvarez, Andrés Castro y Jorge Maldonado.
- Mis amistades** Por su apoyo, cariño e inolvidable compañía durante estos últimos años; gracias a Julián Sierra, José Yantuche, Rodrigo De Rosa, José Vallejo, Erick Lickes, Lucero Alvarado, Rocío Bautista, Ana Fernanda Solares, Melissa Chaverri, y M. Isabel Fernández.
- Mi familia** Por demostrarme su cariño y apoyo incondicional para lograr todo lo que me propongo.
- Ing. Dennis Argueta** Por compartir sus conocimientos y su experiencia para desarrollar mi trabajo de graduación.

**Ing. Luis Sandoval e Ing.
Andy Alonzo**

Por guiarme en cada etapa para elaborar el presente trabajo de la mejor forma.

**Amistades que son
familia**

Por motivarme e inspirarme durante este tiempo, gracias a Luis E. Ruiz Funes, Gabriel Cifuentes, Luis Manuel Chavez, Marlon Estrada, María José M. Reiche.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. FENÓMENO DE LA CAVITACIÓN	1
1.1. Descripción del fenómeno hidráulico	1
1.2. Fases y tipos de cavitación.....	4
1.2.1. Cavitación móvil.....	5
1.2.2. Cavitación fija	6
1.2.3. Cavitación vorticosa.....	8
1.2.4. Cavitación vibratoria	9
1.2.5. Cavitación en un líquido estático	10
1.3. Importancia y efectos de la cavitación	11
1.4. Índice de cavitación o número de Thoma	12
1.4.1. Altura neta de succión positiva	13
1.4.2. Parámetro de cavitación	15
1.4.3. Coeficiente de cavitación.....	18
2. DETERMINACIÓN DEL FENÓMENO DE CAVITACIÓN EN CONDUCTOS A PRESIÓN.....	21
2.1. Cavitación en conductos bajo presión	21

2.1.1.	Delimitación del fenómeno	22
2.1.1.1.	Constricciones del flujo	22
2.1.1.2.	Cambios de dirección o curvas	24
2.2.	Lugares donde ocurre la cavitación.....	25
2.2.1.	Orificios	26
2.2.1.1.	Comportamiento de la cavitación incipiente y crítica en orificios.....	28
2.2.2.	Cambios de dirección.....	31
2.2.3.	Válvulas.....	33
2.2.4.	Turbinas	39
2.2.5.	Bombas	42
3.	MÉTODO DE EVALUACIÓN	47
3.1.	Instrumentos utilizados para el modelo de laboratorio	47
3.2.	Tipos de obstáculos en sistemas de conductos a presión	49
3.2.1.	Retorno o curva en U (sifón)	50
3.2.2.	Constricción y dilatación simultánea	50
3.2.3.	Constricción súbita	50
3.3.	Equipo para la medición de parámetros de la cavitación	51
3.4.	Procedimiento para evaluación y recopilación de datos.....	53
3.4.1.	Procedimiento experimental	53
3.4.2.	Método de aforo	54
3.5.	Descripción del programa de Microsoft Office Excel 2016	55
3.5.1.	Determinación del parámetro de cavitación	55
3.5.1.1.	Datos iniciales	56
3.5.1.2.	Cálculos hidráulicos preliminares	60
3.5.1.3.	Cálculos en retorno en U (nivel 1)	70
3.5.1.4.	Cálculos en constricción y dilatación simultánea (nivel 2).....	74

3.5.2.	Cálculos hidráulicos en nivel 3.....	77
3.5.2.1.	Cálculos en constricción súbita.....	77
3.5.3.	Cálculos hidráulicos posteriores en todo el sistema	79
3.5.3.1.	Comportamiento del flujo según número de Reynolds.....	80
3.5.3.2.	Factores de pérdidas menores o locales en obstáculos.....	82
3.5.3.3.	Margen de error en magnitudes teóricas versus experimentales	84
4.	RESULTADOS.....	87
4.1.	Análisis del comportamiento observado en el modelo hidráulico	87
4.2.	Tablas finales	88
4.2.1.	Obtención de la presión intermedia 1	88
4.2.2.	Obtención de la presión intermedia 2	91
4.2.3.	Coeficiente de pérdidas (k) por igualación de ecuación	93
4.2.4.	Comportamiento de flujo según Reynolds	94
4.2.5.	Factor de pérdidas menores (k) por despeje	95
4.2.6.	Errores analizados.....	97
4.3.	Análisis de resultados experimentales a través del software Excel 2016.....	98
4.3.1.	Promedio de pérdidas en cada nivel.....	98
4.3.2.	Presión intermedia 1 y 2, por variación de sifón	99
4.3.3.	Tipo de flujo según Reynolds por variación de sifón.....	100
4.3.4.	Valores del coeficiente k obtenidos	102

CONCLUSIONES..... 105
RECOMENDACIONES 107
BIBLIOGRAFÍA..... 109
APÉNDICES..... 113
ANEXOS..... 125

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Comportamiento de implosión de una cavidad	3
2.	Clasificación de cavitación	5
3.	Cavitación móvil	6
4.	Cavitación fija.....	7
5.	Cavitación vorticosa	9
6.	Caídas de presión según el diámetro de constricción	23
7.	Cambios de dirección.....	25
8.	Acelerómetro frente a índice de cavitación	29
9.	Índice de cavitación incipiente (izq.) e índice de cavitación crítica (der.).	30
10.	Índice de cavitación para curvas mayores de 60°	32
11.	Índice de cavitación para válvulas.....	34
12.	Índice de cavitación en válvula de cono de 15 cm de diámetro	35
13.	Índice de cavitación en válvula de mariposa de 15 cm de diámetro	36
14.	Índice de cavitación en una válvula de globo de 15 cm de diámetro ...	36
15.	Predicción de la cavitación en válvulas de globo	37
16.	Predicción de la cavitación en válvulas de bola	38
17.	Esquema para definir el coeficiente de thoma en turbinas.....	41
18.	Parámetro crítico de cavitación en función de la velocidad específica .	45
19.	Modelo de cavitación empleado	48
20.	Instalación completa de sistema hidráulico en laboratorio	49
21.	Banco hidráulico.....	51
22.	Cronómetro digital	51
23.	Termómetro de laboratorio	52

24.	Tablero de piezómetros	52
25.	Cubeta	53
26.	Variación de altura de sifón I	56
27.	Gráfico de comportamiento lineal de pérdidas hf1	65
28.	Gráfico de comportamiento lineal de pérdidas hf2.....	67
29.	Gráfico de comportamiento lineal de pérdidas hf3.....	69
30.	Esquema del modelo hidráulico, nivel 1.....	70
31.	Esquema del modelo hidráulico, nivel 2.....	74
32.	Esquema del modelo hidráulico, nivel 3.....	77
33.	Tipos de flujos según Reynolds	81
34.	Gráfico de promedio de pérdidas por sifón (c/nivel).....	98
35.	Gráfico de promedio de Pinter 1 frente a Pv	99
36.	Gráfico de promedio de Pinter 2 frente a Pv	100
37.	Gráfico de comportamiento de flujo por niveles	101
38.	Gráfico comparativo de valores del coeficiente k	102

TABLAS

I.	Datos generales.....	57
II.	Lectura de piezómetros y datos de aforo (sifón I).....	58
III.	Lecturas de piezómetros y datos de aforo (sifón II)	58
IV.	Lecturas de piezómetros y datos de aforo (sifón III)	59
V.	Tiempo total y caudal.....	63
VI.	Pérdidas hf1 en sifón I	64
VII.	Pérdidas hf1 en sifón II	64
VIII.	Pérdidas hf1 en sifón III	64
IX.	Pérdidas hf2 en sifón I	65
X.	Pérdidas hf2 en sifón II	66
XI.	Pérdidas hf2 en sifón III	66

XII.	Pérdidas hf3 en sifón I.....	67
XIII.	Pérdidas hf3 en sifón II.....	68
XIV.	Pérdidas hf3 en sifón III.....	68
XV.	Valores del coeficiente k según niveles de análisis.....	69
XVI.	Ecuaciones a igualar	78
XVII.	Presión intermedia 1, sifón I.....	89
XVIII.	Presión intermedia 1, sifón II.....	89
XIX.	Presión intermedia 1, sifón III.....	90
XX.	Presión intermedia 2, sifón I.....	91
XXI.	Presión intermedia 2, sifón II.....	91
XXII.	Presión intermedia 2, sifón III.....	92
XXIII.	Constricción súbita, sifón I	93
XXIV.	Constricción súbita, sifón II	93
XXV.	Constricción súbita, sifón III	94
XXVI.	Tipo de flujo, sifón I	94
XXVII.	Tipo de flujo, sifón II	95
XXVIII.	Tipo de flujo, sifón III	95
XXIX.	Factor k en sifón I.....	96
XXX.	Factor k en sifón II.....	96
XXXI.	Factor k en sifón III.....	96
XXXII.	Error absoluto entre valor teórico frente a valor experimental	97
XXXIII.	Error relativo entre valor teórico frente a valor experimental.....	97

LISTA DE SÍMBOLOS

z	Altura de posición (energía potencial)
Q	Caudal
k	Coefficiente de pérdidas menores
D	Diámetro de tubería
$E. C.$	Energía cinética
g	Gravedad
L	Litro
m	Metro
N/m^2	Newton por metro cuadrado
Re	Número de Reynolds
x	Pendiente obtenida de gráfica lineal
h_f	Pérdida de energía o carga
h_l	Pérdidas menores
γ	Peso específico
PVC	Policloruro de vinilo, empleado para tuberías
P_{abs}	Presión absoluta
$P_{atmosférica}$	Presión atmosférica
P_v	Presión de vapor
P_{inter}	Presión intermedia en el punto de análisis
ε	Rugosidad
s	Segundos
V	Velocidad
ν	Viscosidad cinemática del fluido

GLOSARIO

Aforo	Determinación de la cantidad de agua que lleva una corriente en una unidad de tiempo.
Bomba	Máquina que permite la elevación y transporte de un fluido.
Capa límite	Región de un fluido viscoso en la que el flujo se ajusta desde la velocidad cero, en la pared fronteriza, hasta un máximo valor respecto a la corriente no perturbada.
Caudal	Cantidad volumétrica de un fluido por unidad de tiempo.
Cavidad	Espacio que se genera dentro de una sustancia o elemento cualquiera.
Cavitación	Formación de cavidades llenas de vapor o gas dentro de un líquido en movimiento.
Conductos	Tubo construido para conducir fluidos de un lugar a otro.
Constricción	Reducción del área de la tubería con la que se trabaja; también conocido como estrechamiento.

Dilatación	Ampliación del área de tubería con el que se trabaja; también conocido como expansión.
Exactitud	Grado de concordancia entre el valor verdadero y el experimental.
Fluido	Sustancia que transita en un medio continuo.
Flujo	Movimiento de un fluido.
Flujo de transición	Corriente en un estado combinado entre el flujo laminar y el turbulento.
Flujo laminar	Fluido que se mueve en recorridos calmados definidos.
Flujo turbulento	Fluido que tiene un movimiento irregular y no calmado.
Hidrodinámica	Parte de la mecánica que estudia el movimiento de los fluidos.
Implosión	Acción de romperse hacia dentro con estruendo en las paredes de una cavidad, en cuyo interior existe una presión inferior a la exterior.
NPSH	Altura neta positiva en la aspiración de una instalación hidráulica.

Pérdidas de energía	Pérdidas de presión debido a la fricción en las partículas de un fluido contra las paredes de un conducto.
Piezómetro	Instrumento que se utiliza para medir la presión de un fluido en un punto.
Precisión	Grado de cercanía entre las medidas de una misma magnitud realizada.
Presión	Fuerza ejercida sobre una unidad de superficie.
Presión absoluta	Presión medida en el vacío perfecto.
Presión atmosférica	Presión que ejerce el aire que forma la atmósfera sobre la superficie terrestre.
Presión de vapor	Presión de saturación del vapor en un líquido ligada a la temperatura.
Presión negativa	Presión menor a la presión atmosférica.
Presión relativa	Presión medida por encima de la presión atmosférica; también conocida como “presión manométrica.”
Racor (<i>Fitting</i>)	Pieza metálica o no, empleada para enlazar y conectar tuberías entre sí y otros perfiles cilíndricos.
Temperatura	Nivel térmico de un cuerpo o sustancia.

Válvula	Dispositivo que regula el paso de un fluido en los conductos o tuberías.
Viscosidad	Propiedad física de los fluidos que se opone al movimiento debido al rozamiento dentro de las partículas de un fluido.
Volumen	Espacio en tres dimensiones que ocupa un cuerpo.

RESUMEN

La presente tesis abarca el análisis y la evaluación del fenómeno de cavitación dentro de los sistemas de conductos a presión, a través de la recopilación de datos teóricos y experimentales, en conjunto con un modelo hidráulico a escala, elaborado en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos, en la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Para examinar, de una forma adecuada, la información recabada experimentalmente, se realizó una vasta investigación bibliográfica sobre dicho tema en diversas fuentes (libros, tesis, artículos científicos, entre otras fuentes físicas y digitales), con el fin de definir y establecer el origen, el desarrollo, las consecuencias y los lugares en donde se presenta dicho fenómeno. Una vez delimitada la información teórica, se construyó un sistema hidráulico, el cual se conectó a un banco hidráulico que permitió la circulación del agua dentro de los conductos; a su vez, este se acopló a un tablero de piezómetros con el objetivo de registrar los datos de las pérdidas en tres puntos críticos del modelo.

Al obtener los distintos valores experimentales, se empleó una metodología de cálculo hidráulico, que propició la determinación de las presiones internas en el modelo para compararlas con la presión de vapor, y con ello generar un parámetro de cavitación. Además, se obtuvieron los valores de los coeficientes de pérdidas (k) para observar la veracidad de los datos arrojados por las corridas realizadas. A razón de la metodología empleada, se comprobó que las presiones en los dos puntos intermedios críticos, aumentan conforme cada corrida; y, debido al mismo aumento de las pérdidas menores dentro del sistema, la presión

de vapor también incrementa, a tal punto, que se concibió el fenómeno de cavitación a lo largo del sistema hidráulico a escala de laboratorio.

OBJETIVOS

General

Analizar y simular el fenómeno de la cavitación dentro de los conductos a presión con base en un sistema hidráulico a escala.

Específicos

1. Identificar los tipos de obstáculos que se presentan en el paso del líquido en sistemas de conductos a presión, a través de un modelo a escala.
2. Determinar los coeficientes de pérdida (k) en los obstáculos identificados que producen presiones menores a la presión de vapor, que genera así el fenómeno de cavitación.
3. Analizar los datos recabados a través de una hoja electrónica en Excel.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de conductos a presión han sido utilizados por décadas en viviendas e industrias, ya que a través de estos se permite el transporte del recurso hídrico con el fin de satisfacer las necesidades básicas para la prosperidad de la vida. En su diseño e instalación, como es de conocimiento, se requieren diversos parámetros para que su funcionamiento y vida útil sean lo más óptimo posible. Sin embargo, en ocasiones por alguna variable de diseño o instalación no controlada, surgen fallos e inconvenientes que entorpecen este funcionamiento, a tal punto de desgastar o dañar severamente las tuberías y accesorios empleados, tal como el fenómeno hidráulico de cavitación.

El fenómeno de cavitación implica la formación de burbujas de aire dentro del sistema debido a cambios de carácter dinámico, que resulta en la disminución de la presión en el interior de este; al mismo tiempo, que se produce un aumento de la presión de vapor en ciertos puntos críticos. Las obstrucciones o puntos críticos que se resaltan son: la curvatura en U (sifón), constricción y dilatación simultánea, y la constricción súbita.

Luego, al circular por el resto del sistema las presiones se nivelan y las cavidades tienden a colapsar contra las paredes internas de los conductos; se data que realmente no existe un criterio exacto para determinar dónde ocurrirá este colapso, o bien, mitigar por completo la aparición de dicho fenómeno en los conductos; por ello, es importante estar consciente de todos los escenarios hidráulicos dentro del diseño y su respectivo tiempo de mantenimiento, para garantizar el buen funcionamiento de los sistemas de abastecimiento de agua.

Se elaboró un sistema hidráulico a pequeña escala que contó con los tres puntos críticos destacados, utilizando materiales de fácil acceso; este sistema se elaboró con el fin de ser puesto a prueba y obtener datos que permitieran determinar si el fenómeno de cavitación se hace presente, y en qué condiciones surge. A través de la teoría recabada se procuró evaluar hidráulicamente el comportamiento del modelo ante la presencia del fenómeno, y el resto de las condiciones que presentó. Conjuntamente, se apoyó la investigación con el programa de Microsoft Excel para facilitar el análisis de datos, y su respectiva presentación final.

En el presente trabajo, en los primeros dos capítulos, se describe la teoría más relevante, producto de una vasta recopilación de información sobre el fenómeno de cavitación, su origen, su desarrollo y los efectos que causa dentro de los sistemas, dispositivos y accesorios hidráulicos, en los que se manifiesta. Por otro lado, en los capítulos tres y cuatro, se indica la metodología de cálculo empleada, con los datos experimentales obtenidos, para que así, sea posible exhibir los gráficos comparativos que permitan el análisis y la interpretación de los valores finales con mayor rapidez y facilidad.

Por último, se aspira a que el presente trabajo de investigación brinde las herramientas necesarias e importantes para demostrar y comprender el comportamiento de la cavitación dentro de los sistemas hidráulicos de conductos a presión; además, se pretende que pueda ser un punto de referencia en información para futuros análisis de dicho fenómeno hidráulico.

1. FENÓMENO DE LA CAVITACIÓN

Para definir el fenómeno de cavitación es importante diferenciar este de la ebullición. Generalmente, ambos en aspecto físico son similares, sin embargo, la concepción de estos es distinta. El ingeniero Christopher E. Brennen, en su libro de *Cavitación y burbujas dinámicas (Cavitation and bubble dynamics)*, indica que la ebullición surge de un aumento en la temperatura a una presión constante en el fluido; lo cual se puede visualizar de una mejor forma si se pone a hervir agua en un recipiente; mientras que la cavitación, por su lado, se concibe por el descenso de la presión del líquido a una temperatura constante. Indicado esto, a continuación, se desarrolla más a fondo el fenómeno.

1.1. Descripción del fenómeno hidráulico

Desde años anteriores, la cavitación ha sido objeto de estudio dentro de los laboratorios en las universidades e instituciones científicas con el fin de identificar el origen de la formación de este fenómeno, y con ello, se ha podido definir dicho fenómeno como: “La cavitación consiste en la formación de vapor de agua a causa del descenso local de la presión por debajo de la presión de saturación del fluido a la temperatura del líquido.”¹

Es decir, cuando la presión presente en el sistema hidráulico desciende o se vuelve negativa en cierta zona, se generan pequeñas burbujas de aire, las cuales pueden definirse como cavidades. Es necesario recalcar que la palabra cavidad implica la existencia de un hueco o espacio vacío en los materiales.

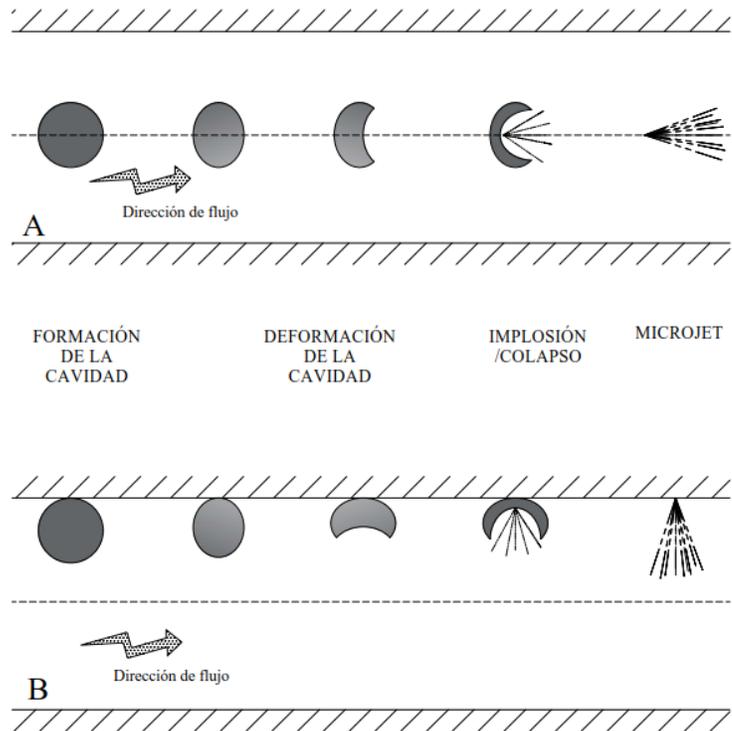
¹GÓMEZ, Ximena A. et al. *Informe mecánico de fluidos: propiedades de los fluidos*. p. 01.

Actualmente, la información disponible sobre dicho fenómeno y sus efectos en las estructuras hidráulicas y los diversos dispositivos en donde se hace presente, es dispersa; sin embargo, dicha información ha sido bastante útil para establecer ciertos parámetros en los trabajos reales que permiten tratar dicho fenómeno al momento de su aparición. En relación con la documentación obtenida se puede hacer una descripción aproximada del proceso de la cavitación y su desarrollo.

Según el ingeniero César Palma, en su trabajo de investigación *La cavitación: el fenómeno y su presencia en vertederos y conductos a presión*, el inicio del fenómeno surge por el cambio de presión por medios estáticos o dinámicos que alcanzan un estado crítico dentro de un sistema hidráulico, que dan paso a la formación de las cavidades llenas de vapor o gas dentro del fluido, las cuales a medida que fluyen empiezan a crecer de forma suave o brusca, y una vez que la burbuja alcanza un radio máximo, y según las condiciones de temperatura y presión, puede colapsar dentro de los conductos. En este último suceso se establece que el comportamiento de la cavidad se asimila como un *micro-jet*, que básicamente consta del cambio de estado gaseoso a un estado líquido de forma súbita.

Ahora bien, cuando ocurre el colapso, también denominado implosión, surgen ondas de presión, a una escala muy pequeña, que se desplazan dentro del fluido. Estas pueden incorporarse rápidamente al curso de la corriente o chocar contra el contorno de la superficie en contacto de manera continua en distintos puntos desconocidos. Se data que este segundo comportamiento de implosión se acompaña de un fuerte ruido crepitante dentro del sistema hidráulico.

Figura 1. **Comportamiento de implosión de una cavidad**



Fuente: MARCHEGANI, Ariel R. *Cavitación*. p. 08.

En la figura anterior se presentan los dos casos de implosión del fenómeno de cavitación ya mencionados:

- El colapso de la cavidad ocurre en dirección del flujo y continúa con la misma.
- Las cavidades presentes, debido a un cambio de presión mayor, son atraídas a la superficie en contacto e implotan contra esta.

Como consecuencia de estos continuos colapsos de las cavidades dentro de los conductos a presión, se infieren diversos inconvenientes dentro del

sistema hidráulico como la aparición de ruidos y vibraciones excesivos, elevación de las presiones originadas por las implosiones de las burbujas, rendimientos muy degradados del flujo y erosiones de la superficie en contacto.

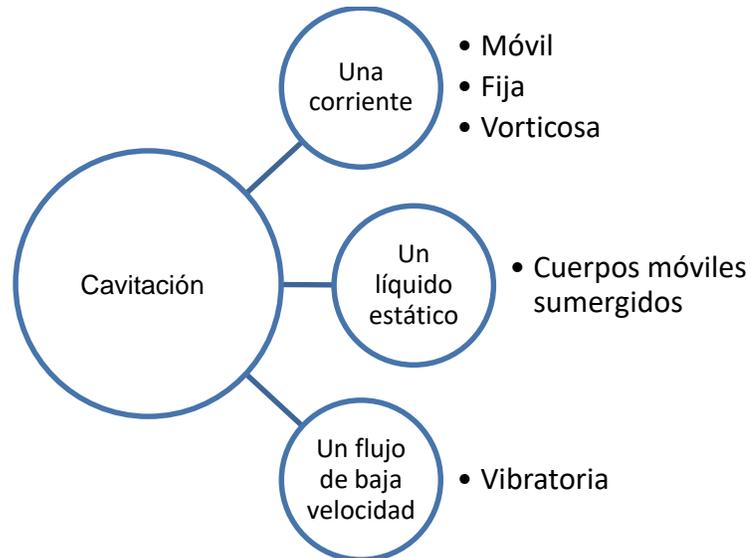
1.2. Fases y tipos de cavitación

Para que ocurra la cavitación dentro de un sistema de conductos a presión se tendrán diferentes elementos en su concepción y desarrollo, los cuales dependerán sobre todo de las condiciones de presión del líquido y de vapor. Estas condiciones, en muchos casos, serán alteradas por efectos de la presencia de una bomba, la cual, afecta a las líneas de energía total y piezométrica del flujo. Además, dentro de los elementos influyentes se tiene en cuenta la presencia de contaminantes sólidos o gaseosos dentro de la zona de cavitación.

Según investigaciones científicas, como el trabajo del profesor Robert Knapp y otros colegas, se ha determinado que la cavitación posee dos grados: incipiente y constante o crítica. La cavitación incipiente hace referencia a la condición en donde las cavidades dentro del sistema son difícilmente perceptibles y la región en donde inicia está perfectamente delimitada. Por otro lado, el grado de cavitación crítico hace alusión a la aparición de las cavidades continuas en un grado sucesivo en el cual ocurre un incremento en la vaporización dentro del líquido y se manifiestan cambios en las condiciones del líquido, como la presión, velocidad, temperatura, entre otros.

A través de un análisis cauteloso el ingeniero César Palma brinda una tipificación del fenómeno de cavitación según las condiciones bajo las cuales surge, se manifiesta y sobre las características físicas que presenta dicho fenómeno. La clasificación es la siguiente.

Figura 2. **Clasificación de cavitación**



Fuente: elaboración propia.

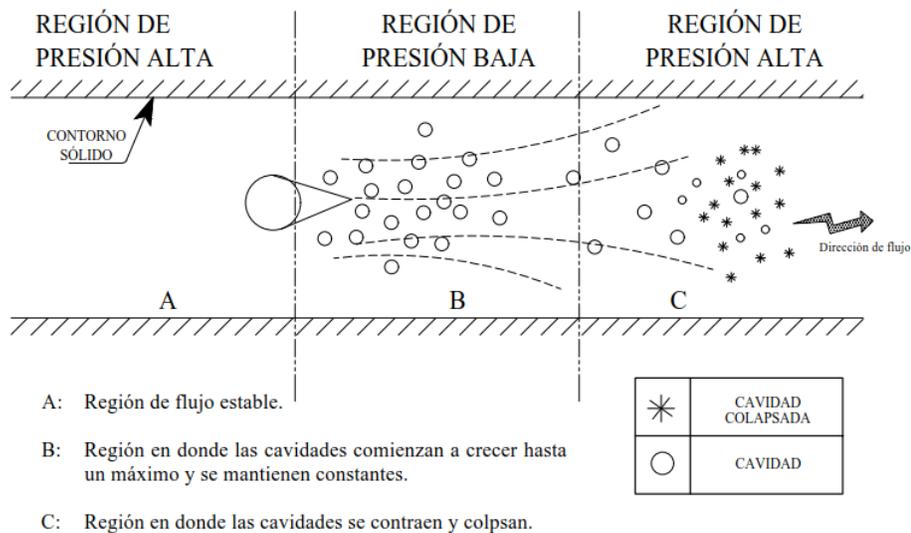
Apoyándose en el trabajo de investigación del ingeniero Arquímedes Rendón, *Origen de la cavitación y sus efectos en estructuras hidráulicas*, se define, a continuación, cada clasificación existente de la cavitación; ya que estas se observaron a través de grabaciones de películas de alta velocidad realizadas, las cuales fueron capaces de captar el desarrollo del fenómeno dentro de las obras hidráulicas.

1.2.1. **Cavitación móvil**

En este caso, la cavitación surge por burbujas transitorias que se forman en el líquido, y al moverse con este, estas tienden a expandirse, contraerse y por último colapsar. En su mayoría, estas aparecen en los puntos de baja presión a lo largo de un límite sólido o en el interior del líquido, en los centros de vértices en movimiento o en las regiones donde exista alta turbulencia.

El inicio del fenómeno ocurre en la zona de mínima presión en el conducto, y como hace referencia su nombre, las cavidades se mantienen en constante movimiento a la velocidad local del líquido y en un sentido guiado por la superficie del límite sólido. Conforme avanza el fluido, las cavidades aumentan su tamaño a lo largo de la zona de baja presión hasta llegar al límite de la región entre presión alta y baja. Cuando dichas cavidades entran a la región donde la presión del sistema excede la presión del vapor del líquido, inicia la implosión de estas; como consecuencia, acontecen contracciones de presiones dentro del conducto.

Figura 3. **Cavitación móvil**



Fuente: PALMA MAYA, César. *La cavitación: el fenómeno y su presencia en vertedores y conductos a presión*. p. 17.

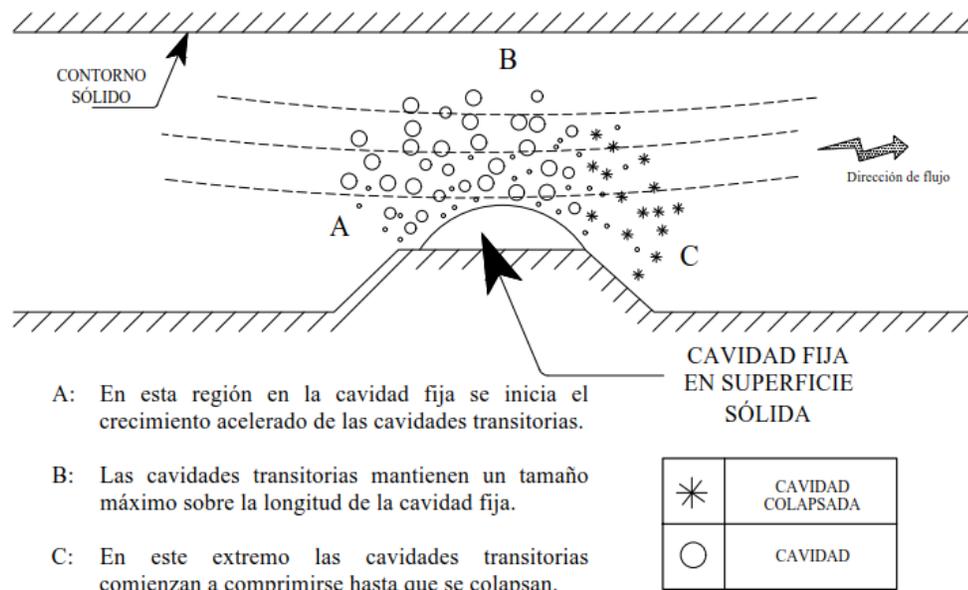
1.2.2. Cavitación fija

La cavitación fija ocurre en ciertas situaciones después de haberse iniciado dicho fenómeno. Básicamente, el proceso de este tipo sucede cuando del flujo

del líquido se separa de la frontera sólida, y da paso a la formación de una burbuja que se adhiere a la superficie rígida más cercana. De esta, posteriormente, se genera una porción de pequeñas cavidades aglomeradas, las cuales son móviles y transitorias. Estas se desarrollan rápidamente hasta alcanzar su máximo tamaño posible en el extremo superior de la cavidad principal, y se mantienen estables por un determinado tiempo, hasta que en su recorrido vuelven a un punto en donde la presión se modifica y provoca el colapso de estas.

En ocasiones, este tipo de cavitación se confunde con una ebullición altamente turbulenta.

Figura 4. **Cavitación fija**



Fuente: PALMA MAYA, César. *La cavitación: el fenómeno y su presencia en vertedores y conductos a presión.* p. 18.

Los tipos de cavitación, fija y móvil, tienen similitudes en apariencia en la última etapa donde se alivia la tensión desarrollada en el líquido aguas abajo de la zona de cavitación, por lo que dificulta la distinción entre una y otra.

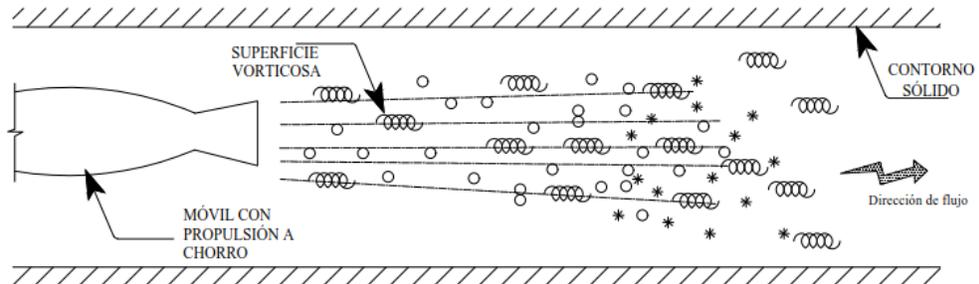
1.2.3. Cavitación vorticosa

En este caso, el fenómeno de cavitación se origina en los núcleos de los vórtices que se forman en zonas de alto cortante, es decir, cuando existe el contacto de dos flujos diferentes. Se presenta en la superficie definida por la zona de separación y no sobre algún cuerpo sumergido. Su desarrollo ocurre siempre y cuando exista un deslizamiento entre cuerpos líquidos que logren formar vórtices en los cuales la presión absoluta decrezca por debajo del valor crítico del fluido. Como parte de sus características se identifica que tienen periodos lentos de colapsos y etapas consecutivas de bajas presiones, por lo que, el tiempo de vida de una cavidad vorticosa es más perdurable en comparación a la cavitación móvil o fija.

Según investigaciones realizadas, los daños con este tipo de cavitación solo pueden existir si el colapso de las burbujas es sobre o muy cerca de las superficies adyacentes al vórtice, por ejemplo, el final de los álabes, los propulsores de bombas y turbinas, y en la salida de un tubo de aspiración cuando se trabaja con cargas parciales o sobrecargas; esto puede acompañarse con un nivel apreciable de vibraciones.

También, cabe mencionar que en ocasiones este tipo de cavitación sucederá en pasajes de agua relativamente largos, en los cuales la turbulencia se desarrollará considerablemente antes de alcanzar la zona de cavitación. Para una mejor visualización se tiene el siguiente esquema.

Figura 5. Cavitación vorticosa



Las cavidades móviles que se generan entre la frontera, el chorro y el flujo principal, son transportadas por el flujo y colapsan en puntos bajos de presión, los cuales son lejanos al origen.

*	CAVIDAD COLAPSADA
○	CAVIDAD
☞	FLUJO VORTICOSO

Fuente: PALMA MAYA, César. *La cavitación: el fenómeno y su presencia en vertedores y conductos a presión.* p. 19.

1.2.4. Cavitación vibratoria

En la cavitación vibratoria se presenta un flujo continuo que sufre distintos ciclos de cavitación debido a la exposición de una velocidad tan baja. Durante este fenómeno vibratorio, las fuerzas que producen las formaciones y colapsos continuos de los ciclos de cavitación corresponden a diversas series de ondas de presión con alta amplitud y frecuencia dentro del líquido. Las pulsaciones de presión son generadas por una superficie sumergida que vibra en dirección normal e introduce ondas de presión en el líquido.

Cabe mencionar que este tipo de cavitación no se formará a menos que la amplitud de la variación de presión sea lo suficientemente grande como para

causar una caída de presión hasta el valor de la presión de vaporización del líquido o por debajo de ella.

Como dato importante, explica el ingeniero Rendón, se tendrá en cuenta que la superficie causante de la cavitación vibratoria se produce en dos formas:

- De modo no intencional, tal como el efecto secundario de la operación de una máquina.
- De forma intencional, la cual será diseñada específicamente para producir un tren de ondas de presión dentro del líquido.

1.2.5. Cavitación en un líquido estático

No existe una diferencia sustancial entre el fenómeno de cavitación que ocurre en un fluido en movimiento y la que surge por un cuerpo que se mueve a través de un líquido estacionario. En ambos sucesos los factores importantes a tomar en cuenta son las velocidades relativas y las presiones absolutas; se dice que cuando estos son similares, se desarrolla el mismo tipo de cavitación. Sin embargo, es probable que la única diferencia notoria sea el nivel de turbulencia del líquido, ya que en el líquido estático es más bajo.

Según César Palma Maya, la máquina hidráulica es un claro ejemplo de la combinación de las dos condiciones. Como primer punto se analiza que, en la carcasa, solo el líquido tiene un movimiento que fluye por las superficies guía estacionarias. En cambio, en el rodete, tanto las superficies guías como el líquido están en movimiento.

Lo mencionado indica que el fenómeno de cavitación puede surgir en diversas situaciones, las cuales generalmente son difíciles de reconocer a simple vista.

1.3. Importancia y efectos de la cavitación

Con base en los estudios de la hidráulica, se logran determinar los puntos críticos del sistema en donde se alteran y/o modifican las variables actuantes hasta provocar, en este caso, el fenómeno de cavitación. Una vez se haga presente dicho fenómeno, es lógico pensar que habrá una reacción por ley física dentro del sistema que modificará el funcionamiento del mismo. Siguiendo con las referencias de análisis desarrollado por el ingeniero Arquímedes Rendón, se detallan los efectos investigados causados por la cavitación.

Como primer efecto, se tiene la modificación hidrodinámica del flujo del líquido, los cuales pueden ser diversos, y obviamente indeseables. Como inferencia, y con base en la información recabada en incisos anteriores, las modificaciones que produce la cavitación abarcan cambios de energía bruscos que generan una interrupción de la continuidad y el volumen de la fase líquida en los puntos en donde se presenta la presión negativa dentro de las tuberías.

Como segundo efecto, se tiene el daño ocasionado por la cavitación en la superficie del límite sólido en donde circula el flujo. Este daño surge debido a que, como se ha identificado, la cavidad es una burbuja de aire dentro del líquido; por lo que, con un criterio sencillo, se analiza que, al momento de la liberación de este oxígeno de manera espontánea, brusca y de forma repetitiva en tan corto tiempo, se produzca un desprendimiento (erosión) del material contra el que choca.

Por consiguiente, con la manifestación de estos efectos es significativo considerar el fenómeno de cavitación dentro del diseño de los conductos a presión, ya que, aunque no se pueda identificar el tiempo preciso en el que surgirá dentro del sistema; es de conocimiento que habrá varios daños que perjudicarán el funcionamiento del mismo, y que, con el tiempo, podrá acortar la vida útil de las tuberías, válvulas, bombas y demás accesorios presentes en el sistema hidráulico.

1.4. Índice de cavitación o número de Thoma

Es importante destacar que se deben tener en cuenta los índices que proporcionen mediciones cuantitativas que reflejen el comportamiento de la hidrodinámica del flujo; tanto para dar un valor único como un valor relativo a los diferentes grados, en este caso, de la cavitación (incipiente o gradual).

Para este índice, se denomina el número de Thoma o coeficiente de cavitación, el cual permite evaluar bajo que parámetros el fenómeno puede surgir. Dentro de las principales variables que afectan en dicho fenómeno son la geometría de la frontera, la presión absoluta, la velocidad y la presión crítica con la cual que se forman o se mantienen dichas cavidades; y, a su vez, existen variables inferiores que alteran las relaciones entre las propiedades del líquido en estudio, como la viscosidad, tensión superficial, características de vaporización, entre otras.

Antes de detallar el coeficiente de cavitación es importante que se conozca la influencia de la altura neta de succión positiva y el parámetro de cavitación dentro del estudio.

1.4.1. Altura neta de succión positiva

La condición de la altura neta de succión positiva dentro del sistema, es parte importante del estudio, ya que influirá en el comportamiento del mismo al momento de que surja el fenómeno de cavitación. Generalmente, se denomina como NPSH, que hace referencia a su acrónimo del término en inglés como *Net Positive Suction Head*².

Este dato surge por las características de las bombas y la altura geométrica de succión ($NPSH_{Requerida}$) que se tenga; también, de las características de la instalación y del líquido que se esté bombeando ($NPSH_{Disponible}$). De los términos anteriores cabe resaltar una condición importante dentro del sistema, la cual es:

$$NPSH_{Disponible} \geq NPSH_{Requerida}$$

Si se cumple esta condición, existe una gran probabilidad de que no se formen las cavidades dentro del fluido. Según Robert L. Mott, en su libro *Mecánica de fluidos*, la $NPSH_{Disponible}$ debe ser como mínimo un 10 % más grande que la $NPSH_{Requerida}$

Para el valor de $NPSH$, se tendrá en cuenta lo siguiente,

$$NPSH = \frac{P_a}{\rho g} - H_s - \frac{P_v}{\rho g} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

² RENNELS, Donald C. y HUDSON, Hobart M. *Pipe flow: a practical and comprehensive guide*. p. 220.

- $P_a = \text{presión atmosférica absoluta } [N/m^2]$
- $P_v = \text{presión de vapor } [N/m^2]$
- $H_s = \text{altura manométrica de succión } [m]$
- $\rho = \text{densidad del líquido } [kg/m^3]$
- $g = \text{gravedad } [m/s^2]$

Prácticamente, en la formula anterior se indica que la altura de succión positiva neta dependerá de la presión del vapor del fluido que se bombea, las pérdidas de energía en el tubo de succión, la ubicación del almacenamiento del fluido y la presión que esté presente en este.

Para hallar el valor de la altura manométrica de succión se tendrá en cuenta lo siguiente:

$$H_s = h_s + h_{fs} + \frac{V_s^2}{2g} + h_{me} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

- $h_s = \text{altura del rotor de la bomba con respecto al nivel del agua en el tanque desde donde se esté succionando el caudal } [m]$
- $h_{fs} = \text{pérdidas por fricción en la tubería de succión } [m]$
- $\frac{V_s^2}{2g} = \text{altura de la velocidad en la misma tubería } [m]$
- $h_{me} = \text{pérdidas menores causadas en la entrada de la tubería de succión } [m]$

La NPSH se podrá obtener en la mayoría de casos por el fabricante de la bomba, en caso contrario, tendrá que encontrarse en condiciones de laboratorio.

1.4.2. Parámetro de cavitación

Para una práctica general se ha vuelto de uso común la implementación de un parámetro básico desarrollado a partir de condiciones elementales de similitud.

Suponiendo un flujo relativo entre un objeto sumergido y el líquido que lo rodea, se manifestará una variación de presión a lo largo de la superficie del objeto. Esto implicará una diferencia de presiones entre un punto de objeto y un punto a alguna distancia de este en el líquido; la diferencia será proporcional al cuadrado de la velocidad relativa entre ambos, lo que conduce a un coeficiente de presión adimensional ($-C_p$), que se expresa de la siguiente forma:

$$-C_p = \frac{P_o - P}{\frac{\rho V_o^2}{2}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

- $P_o =$ presión en el líquido inalterado $[N/m^2]$
- $P =$ presión en un punto del objeto $[N/m^2]$
- $V_o =$ velocidad del líquido no afectado, relativa al objeto $[m/s]$
- $\rho =$ densidad del líquido $[kg/m^3]$

Al observar la ecuación anterior se denota que se omite la gravedad, no obstante, de ser necesario se puede incluir. En ocasiones, la presión en un punto del objeto se convertirá en la presión mínima; esto se logrará al incrementar la velocidad relativa para un valor fijo de la presión P_o ; o bien, disminuyendo

gradualmente P_o al mantener la velocidad constante. En ambos procedimientos se logrará la disminución de los valores absolutos de las presiones locales sobre la superficie del objeto.

Suponiendo que se descarta la tensión superficial, la presión mínima pasará a ser la presión del contenido de las cavidades, expresándose como presión de burbuja (P_b). Entonces, el parámetro de cavitación se definirá como:

$$K_b = \frac{P_o - P_b}{\frac{\rho V_o^2}{2}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

O bien, en términos de la carga de presión, sería:

$$K_b = \frac{(P_o - P_b)/\gamma}{\frac{V_o^2}{2g}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

- $P_o =$ presión estática absoluta en un punto de referencia $[N/m^2]$
- $V_o =$ velocidad de referencia $[m/s]$
- $P_b =$ presión absoluta en la cavidad o burbuja $[N/m^2]$
- $\gamma =$ peso específico del líquido $[N/m^3]$

Asumiendo que la cavitación suceda en tensiones normales en un punto cualquiera del líquido, estas son reducidas a cero, lo que implica que P_b sea igual a la presión de vapor P_v . Y, el parámetro quedaría en la siguiente forma:

$$K = \frac{P_o - P_v}{\frac{\rho V_o^2}{2}} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Como hace referencia el ingeniero César Palma, el valor de k , para el cual el inicio de la cavitación tiene lugar, se designa como K_i . Para un valor crítico de K_i , este estará en función de la magnitud absoluta del coeficiente de presión mínimo, para cualquier cuerpo.

Al examinar la situación, se infiere que el valor inicial de K , decrecerá una vez comience el fenómeno, ya que la presión mínima se convertirá en la presión de la cavidad, la cual se mantendrá constante mientras la velocidad y la presión de referencia disminuirán. Para cada etapa de desarrollo o grado de cavitación en un cuerpo en particular, K tendrá un valor definido.

Para el desarrollo del parámetro de cavitación en un campo gravitacional, en diferencia de presión por efectos dinámicos, y en especial en cuerpos que cambian su elevación conforme se mueve el sistema, se establece que “el campo de gravedad se traduce como diferencia de carga hidráulica”³, lo cual se expresa de la siguiente forma:

$$P_o - P_{min} = (P_o - P_{min}) + \gamma(h_o - h_{min}) \quad \text{Ecuación (7)}$$

Y, en condiciones de presiones:

$$K = \frac{(P_o + \gamma h_o) - (P_v + \gamma h_{min})}{\rho V_o^2 / 2} \quad \text{(Ecuación 8)}$$

³ PALMA MAYA, César. *La cavitación: el fenómeno y su presencia en vertederos y conductos a presión*. p. 24

Donde:

- $h = \text{elevación [m]}$
- $\gamma = \text{peso específico del líquido [N/m}^3\text{]}$

El valor del parámetro de cavitación depende principalmente de la forma del objeto inmerso, el cual podría ser alguna boquilla o venturímetro. El parámetro K_b o K se utiliza para relacionar las condiciones de flujo con la probabilidad de que ocurra la cavitación. Se remarca que el parámetro de cavitación es una medida incompleta que está limitada de toda similitud dinámica.

1.4.3. Coeficiente de cavitación

El coeficiente o índice de cavitación surge de la relación entre la altura neta de succión positiva y la carga absoluta total producida por el bombeo, es decir:

$$\sigma_T = \frac{NPSH_R}{H} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

- $NPSH_R = \text{altura neta de succión positiva requerida [m]}$
- $H = \text{carga absoluta total producida o absorbida, menor a la carga de presión en vapor [m]}$

De forma explícita, se tiene que la carga absoluta se conforma de las distintas presiones presentes dentro del sistema y según sea cada caso; su expresión matemática sería:

$$H = \frac{P_{atm}}{\gamma} + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} - \frac{P_v}{\gamma} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

- P_{atm} = presión atmosférica $[N/m^2]$
- P = presión estática u absoluta $[N/m^2]$
- P_v = presión de vapor $[N/m^2]$
- γ = peso específico del líquido $[N/m^3]$
- V = velocidad $[m/s]$
- g = gravedad $[m/s^2]$

Por otra parte, corresponde señalar que la carga de presión de vapor, de cualquier líquido, tiende a aumentar con rapidez, con el incremento de la temperatura. En la sección de anexos, se brinda una tabla con valores aproximados sobre la presión de vapor conforme a la carga de presión y la temperatura.

Prosiguiendo con el análisis, el coeficiente de Thoma se torna crítico cuando se relaciona la altura dinámica de aspiración crítica respecto al cambio total de energía a través del sistema hidráulico; si se realiza una igualación de las pérdidas por fricción y la carga de velocidad, se tendrá lo siguiente:

$$\sigma_{Tinstantáneo} = \frac{P_{atm} - P - P_v}{H} \quad (\text{Ecuación 11})$$

El valor del coeficiente de cavitación siempre tendrá un valor definido para cada instalación, y en cada punto de observación, con el fin de obtener un margen

de seguridad respecto al funcionamiento de la máquina. Para que estos valores sean significativos, se debe respetar la siguiente condición:

$$\sigma_{Tinstantáneo} \geq \sigma_{crítico}$$

Debido a que, si esta condición se cumple, los efectos de cavitación no serán tan severos dentro del sistema hidráulico.

2. DETERMINACIÓN DEL FENÓMENO DE CAVITACIÓN EN CONDUCTOS A PRESIÓN

Dentro de los sistemas hidráulicos, generalmente, surgen inconvenientes que no son fáciles de detectar en muchas ocasiones, por ello, tanto en su diseño como en su mantenimiento es importante estar atentos a los diversos factores que influyen en estos. Como parte de esta investigación se describirá el fenómeno de cavitación actuando en los conductos bajo presión, comúnmente utilizados en viviendas, edificios, entre otros.

2.1. Cavitación en conductos bajo presión

En la ingeniería civil, el empleo de los conductos bajo presión es habitual y de suma importancia, ya que a través de ellos se llevan a cabo diferentes procesos que permiten satisfacer una o varias necesidades del ser humano, como, por ejemplo, las plantas generadoras de energía eléctrica, redes de abastecimiento de agua potable o de alcantarillado, entre otros procesos.

Dentro de los inconvenientes que se pueden presentar en los conductos a presión, es que en aspecto físico son totalmente cerrados, lo que dificulta observar de forma directa el comportamiento del flujo dentro de estos. Por ende, en el momento en que surge la cavitación dentro de estos, la detección del punto exacto donde se presenta es complicado. Con base en la información proporcionada por el ingeniero Arquímedes Rendón, *Origen de la cavitación y sus efectos en estructuras hidráulicas*, existe una gran probabilidad que se genere en casi cualquier punto del conducto en donde se modifique la geometría de la sección de paso, exista un cambio de dirección; o en sí, en donde pueda

considerarse la existencia de algún obstáculo al paso del líquido, tales como las bombas, válvulas, turbinas, codos, deflectores, estrangulamiento del tubo, entre otros puntos susceptibles.

Asimismo, para que ocurra dicho fenómeno se deberán tener presentes las variaciones de presiones que favorezcan la concepción de la cavitación. Según, el ingeniero César Palma, *La cavitación: el fenómeno y su presencia en vertederos y conductos a presión*, usualmente, el origen se presenta en las caídas de presión lo suficientemente grandes que traerán consigo la disminución de la presión de vaporización del líquido. También, se agrega que el grado de pureza del líquido que se esté transportando, así como el aire o los gases disueltos del mismo, tendrán mucha influencia en este proceso.

2.1.1. Delimitación del fenómeno

Ahora bien, en continuación con las ideas del ingeniero César Palma, se identifican las condiciones para que se produzca la cavitación, las cuales se delimitan en dos grupos:

- Estrangulamientos de flujo (constricciones)
- Cambios de dirección (curvas y codos)

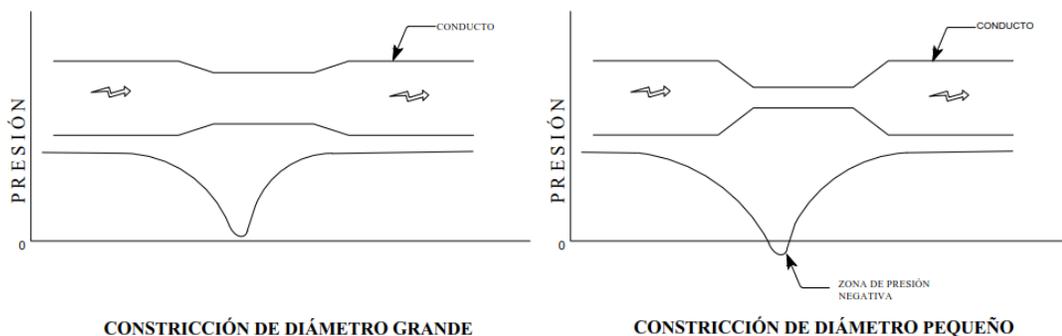
2.1.1.1. Constricciones del flujo

En este caso, cuando se hace referencia a la constricción del flujo, se indica que se tendrá un descenso en la presión local, haciendo valer la condición que

“[...] mientras más pequeño es el diámetro contracto, mayor será la velocidad del flujo [...]”⁴ a través del conducto, y por ende, la caída de presión será mayor.

Al producirse la situación anterior, según el investigador Donald C. Rennels en su libro *Flujo de tuberías: una guía práctica y completa (Pipe flow: a practical and comprehensive guide)*, se debe tener en cuenta que, en esta zona, la presión absoluta existente en la garganta de la constricción, incurrirá a la presión de vapor del líquido, lo que ocasionará la cavitación. A medida que las cavidades se desarrollen y se adentren a una región de mayor presión, estas colapsarán. De la implosión se derivarán ondas de presión de alta intensidad capaces de dañar cualquier material; y, a su vez, producirán pequeños sonidos, que serán similares a los de arenas hasta gravas que fluyen dentro del sistema hidráulico. En añadidura, se resalta que las válvulas o llaves abiertas actuarán como constricciones, y generarán este tipo de cavitación.

Figura 6. **Caídas de presión según el diámetro de constricción**



Fuente: PALMA MAYA, César. *La cavitación: el fenómeno y su presencia en vertederos y conductos a presión.* p. 99.

⁴ PALMA MAYA, César. *La cavitación: el fenómeno y su presencia en vertederos y conductos a presión.* p. 98.

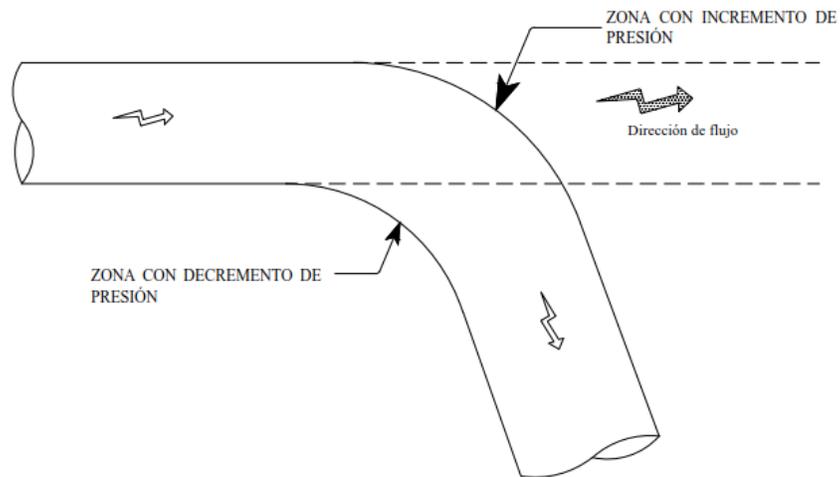
Como se observa en la figura 6, cuando el diámetro es grande las caídas de presión son menores y controlables, y por inferencia, la probabilidad de que surja el fenómeno de cavitación dentro de este es bajo. En cambio, con el diámetro pequeño, como ya se ha informado, la velocidad del flujo aumenta, y la caída de presión, en este caso, es mayor, a tal punto de llegar a una zona de presión negativa, que producirán las cavidades.

2.1.1.2. Cambios de dirección o curvas

En los cambios de dirección o curvas en los sistemas de tuberías, se analiza que se produce el efecto físico de que, a menor radio de curvatura, la velocidad del flujo será mayor dentro de esta zona, y, por ende, las fuerzas del fluido impactarán de tal forma que habrá un cambio significativo en el comportamiento de las presiones que lleva el sistema.

Al examinar las presiones externas e internas actuantes en la curva, se deduce que, las presiones externas aumentarán en su magnitud, ya que estas son las que prácticamente forzarán el cambio de dirección. Mientras que las presiones internas descenderán rápidamente para que el flujo se desligue de la superficie sólida, y se alcance el cambio. Según el análisis abarcado por el ingeniero Arquímedes Rendón, es en este contraste de presiones, en el cual suscita el fenómeno de cavitación.

Figura 7. **Cambios de dirección**



Fuente: PALMA MAYA, César. *La cavitación: el fenómeno y su presencia en vertedores y conductos a presión.* p.100.

Con la figura anterior, se procura representar de la mejor forma, lo que sucede con las presiones internas y externas al momento de un cambio de dirección, dando a conocer el choque de fuerzas que originan el fenómeno. Se infiere que, si la presión interna adquiriera valores lo suficientemente pequeños, las cavidades lograrán desarrollarse hasta ser conducidas a zonas en donde la presión aumente, y una vez más, colapsen dentro de las tuberías.

2.2. Lugares donde ocurre la cavitación

Dentro de lo que se ha descrito en la investigación, se destaca que el estudio del comportamiento del fenómeno de cavitación se debe realizar a través del parámetro o índice de cavitación característico según las diferentes condiciones que se presenten en el fluido. Sin embargo, debido a que no es posible establecer un parámetro universal para todo tipo de obstáculo, se razona

que, en ciertas situaciones es preferible identificar, como primera instancia, el potencial de cavitación dentro del sistema, para obtener un índice de referencia con el cual, después de su análisis requerido, se pueda tipificar para el obstáculo en estudio.

A continuación, y con base en la información que provee el ingeniero César Palma, en su trabajo mencionado anteriormente, se detallarán los obstáculos más habituales dentro de los sistemas de conductos a presión, aludiendo los efectos que estos tienen dentro del flujo e incluyendo el análisis respectivo para identificar los diferentes índices de cavitación vinculados a estos.

2.2.1. Orificios

Dentro de los sistemas de tubería, en muchas situaciones se incorporan los orificios con el objeto de que se regule la presión, disipen la energía, permitan la medición del caudal dentro del sistema, o bien, limiten el flujo para el balance y distribución adecuada de la presión dentro el sistema.⁵

Debido a la diversidad de uso de los orificios, resulta ser complicado establecer un solo índice de cavitación que pudiese englobar todas sus aplicaciones, y determinar el valor de dicho índice. Por lo tanto, como primera instancia, se sugiere siempre identificar los límites principales en los que ocurre dicho fenómeno, los cuales serán guía para poder realizar un estudio adecuado de este.

En ocasiones, como lo advierte el científico Donald C. Rennels, en los sistemas hidráulicos se originarán caídas de presión significativas, en especial

⁵ RENNELS, Donald C. y HUDSON, Hobart M. *Pipe flow: a practical and comprehensive guide*. p. 139.

en las regiones en donde el fluido atraviesa algún estrangulamiento, las cuales se expresarán mediante el coeficiente de descarga, o bien, con una gráfica que compare dicha caída de presión contra la velocidad del flujo.

Por consiguiente, al momento de la constricción el coeficiente de descarga podrá verse afectado por los efectos de la cavitación. Sucede que “[...] a mayor coeficiente de cavitación (σ) menor coeficiente de descarga [...]”⁶ Al examinar este punto, se deduce que el volumen que la presión de vapor ocupa, en ese momento, afecta significativamente al volumen total del flujo. Además, se infiere que habrá un menor caudal, y, por ende, un funcionamiento ineficiente dentro del sistema.

Ahora bien, de acuerdo con el libro de *Reacción de la ingeniería ante la cavitación (Cavitation reaction engineering)*, por el químico Yatish T. Shah, la mejor expresión matemática para determinar el índice de cavitación dentro de este tipo de constricción, es:

$$\sigma = \frac{P_d - P_v}{P_u - P_d} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde:

- $P_d =$ presión aguas abajo del orificio. $[N/m^2]$
- $P_v =$ presión de vaporización del fluido de prueba, relativa a la presión atmosférica $[N/m^2]$
- $P_u =$ presión aguas arriba del orificio. $[N/m^2]$

⁶ RENDÓN VARGAS, Arquímedes Rafael. *Origen de la cavitación y sus efectos en estructuras hidráulicas*. p. 58.

Básicamente, la ecuación anterior se centra en relacionar las presiones actuantes dentro de los orificios, esto con el objetivo de poder hallar los parámetros generales en el tipo de orificio que se esté examinando.

2.2.1.1. Comportamiento de la cavitación incipiente y crítica en orificios

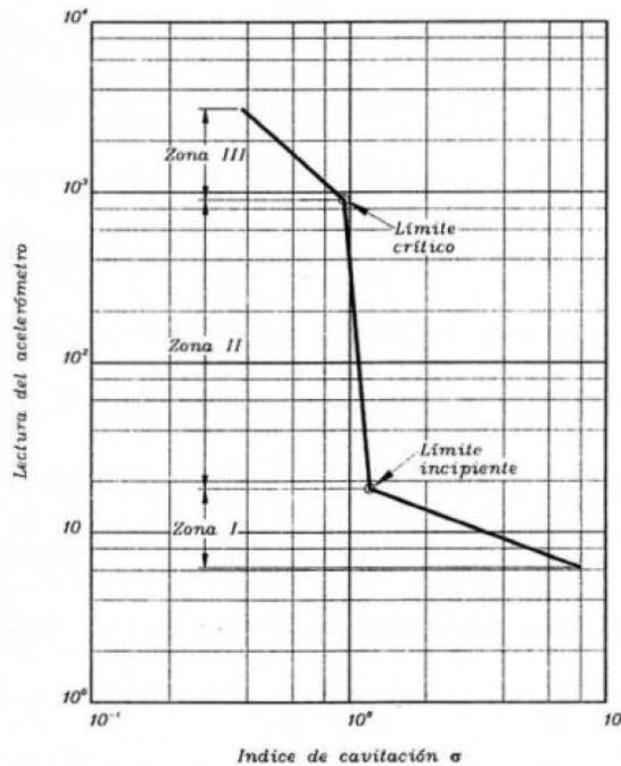
El fenómeno de cavitación, como ya se ha mencionado en el capítulo anterior, consta de diferentes grados o niveles (cavitación incipiente y cavitación crítica) a lo largo de su desarrollo; los cuales han sido determinados con investigaciones de laboratorio. Como parte del estudio desarrollado por el ingeniero César Palma, se hacen referentes los científicos Tullis y Govindarajan (Colorado State University, 1973), quienes logran establecer tres diferentes zonas que explican el comportamiento del índice de cavitación en los orificios, medidos por aceleraciones.

Como resultado surge la figura 8, la cual representa las tres zonas en donde se desarrolla la cavitación, desde el punto de vista del funcionamiento óptimo del sistema hasta el límite en el cual se manifiesta la cavitación crítica. De manera más descriptiva, y referenciando la figura 8, se observa que en la zona I se inicia en la frontera entre un funcionamiento adecuado de los orificios y finaliza, en el margen en donde la cavitación incipiente ocurre.

Asimismo, en la zona II se percibe la transición del fenómeno de cavitación en estado incipiente a un estado crítico, lo que indica que el funcionamiento en esta región se torna complicado, y dicho fenómeno empieza a ser un factor dañino para los orificios. Por último, se contempla la zona III, en donde la cavitación pasa de un estado ligero a un estado moderado, es decir, que la presencia de este ya es bastante notoria dentro de los orificios.

Es conveniente resaltar que, entre las zonas II y III, es en donde ocurre el desarrollo principal del fenómeno; y, cuando las cavidades alcancen el límite crítico, se especula, que al superar dicho límite proseguirá la implosión de estas.

Figura 8. **Acelerómetro frente a índice de cavitación**

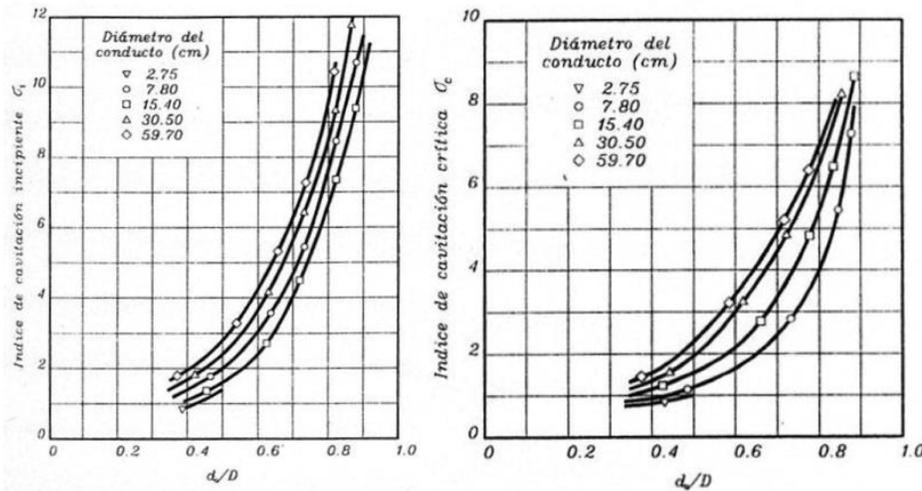


Fuente: RENDÓN VARGAS, Arquímedes. *Origen de la cavitación y sus efectos en estructuras hidráulicas*. p. 59.

Por otro lado, conforme al análisis de los autores César Palma y Arquímedes Rendón, se toma como referencia la figura 9, en donde se relaciona el índice de cavitación (σ) contra la correlación entre el diámetro del orificio (d_o) frente al diámetro del tubo (D). Estos tres parámetros permiten identificar que el índice de

cavitación, a medida que aumenta el tamaño de la correlación de diámetros, este incrementa su valor.

Figura 9. Índice de cavitación incipiente (izq.) e índice de cavitación crítica (der.)



Fuente: PALMA MAYA, César. *La cavitación: el fenómeno y su presencia en vertederos y conductos a presión.* p. 105.

Con base en las investigaciones preliminares, se señala que:

La variación en el índice depende más del tamaño del tubo que de la variación de la velocidad y presión para un mismo tubo [...] pues se ha visto que, para una presión dada, la cavitación comienza a menor velocidad conforme el diámetro del tubo crece.⁷

Es decir, el volumen total de cada tubo será un factor importante para el análisis del fenómeno.

⁷ PALMA MAYA, César. *La cavitación: el fenómeno y su presencia en vertederos y conductos a presión.* p. 103-104.

Se examina que, con un diámetro mayor de tubo, el espacio a llenar con el fluido será lo suficientemente grande para que exista una presión de vapor lo bastante conveniente para la generación de cavidades con una velocidad baja. Por supuesto, esto permite considerar que, si la generación de cavidades inicia a una velocidad pequeña, en el instante en que esta se aumente, se corre el riesgo de que la cavitación, de igual forma, se incremente significativamente. Lo que incurrirá en daños severos para el objeto en estudio.

2.2.2. Cambios de dirección

En los sistemas hidráulicos existen accesorios que permiten el cambio de dirección de flujo según su conveniencia, tales como, los codos, tees y cruces de distintos materiales, ángulos y diámetros.

Según investigaciones previas, tal como lo indica César Palma, se identifica que la probabilidad de que la manifestación del fenómeno cavitativo surja, es menor si se compara con la posibilidad dentro de las válvulas, bombas y orificios. No obstante, no se descarta por completo la eventualidad de que en algunos escenarios exista y sea necesario conocer la magnitud de la presencia del fenómeno dentro de estos.

Con base en la publicación del ingeniero Arquímedes Rendón, se implementa una ecuación que permite conocer la ocurrencia del fenómeno dentro de las curvas mayores a 60 grados. La expresión es la siguiente:

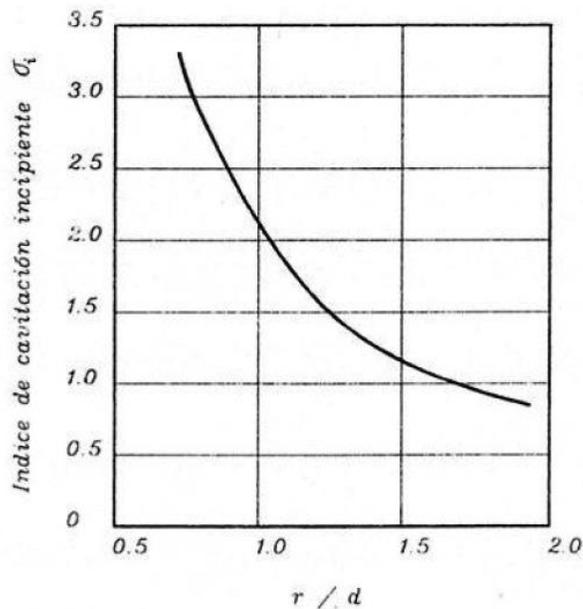
$$Probabilidad = 0,68 \log\left(\frac{\sigma}{r/d}\right) + 1 \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde:

- σ = índice de cavitación
- r = radio de curvatura [m]
- d = diámetro del conducto [m]

Para complementar el análisis, se utiliza la siguiente gráfica:

Figura 10. Índice de cavitación para curvas mayores de 60°



Fuente: PALMA MAYA, César. *La cavitación: el fenómeno y su presencia en vertederos y conductos a presión*. p. 119.

Con la gráfica anterior se deduce que, de una manera adecuada, se puede identificar la magnitud de la probabilidad que se obtenga en el estudio dentro de los accesorios; ya que, si se obtiene un dato muy alto, se puedan generar soluciones para que el fenómeno no continúe afectando a dichos accesorios hasta dañarlos completamente.

2.2.3. Válvulas

Las válvulas hidráulicamente tienen como función principal el regular el flujo dentro de los sistemas al abrir, cerrar o parcialmente obstruir el paso, en el cual estén instaladas.⁸

Cabe mencionar que, si estas se operan inadecuadamente, o bien, no se elige la válvula apropiada para el tramo que se requiere, es imperativo suponer que existirán inconvenientes. Para una mejor ilustración, se analiza que, si se cierra una válvula muy deprisa, habrá varios trastornos hidráulicos, entre ellos la cavitación. De acuerdo con la investigación del ingeniero César Palma, el fenómeno surge a causa del incremento en la relación entre la caída de presión contra la presión del sistema, esto quiere decir que entre mayor sea la caída de presión mayor será el riesgo de presentarse el fenómeno; y, por ende, el desgaste en estas será rápido, tendrá fugas y necesitará reposición.

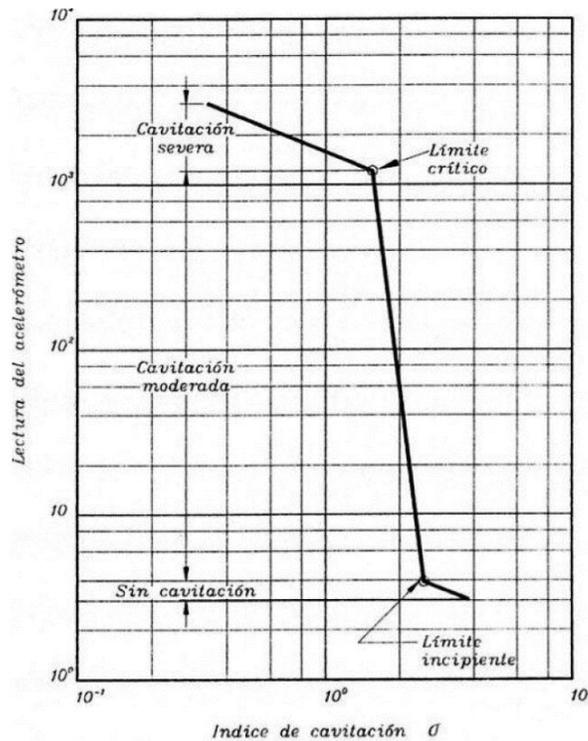
Para determinar el índice de cavitación dentro de las válvulas, se debe tener en cuenta el tipo, el tamaño y la presión a la que es operada. Como se ha mencionado anteriormente, no se puede establecer un índice de cavitación general, por lo que, una vez más, es apropiado el establecer límites de cavitación para dicho sistema, además, de tomar en consideración los efectos que dicho fenómeno puede causar. La elección del límite para este caso será con base en el índice de cavitación crítica, ya que en este punto el daño que se presenta es mínimo, y no evidencia ninguna disminución de la vida útil de la válvula.

A partir de la siguiente figura, se examina que una vez sobrepasado el límite incipiente con un mínimo aumento de la velocidad dentro del sistema, la

⁸ RENNELS, Donald C; HUDSON, Hobart M. *Pipe flow: a practical and comprehensive guide*. p. 205.

cavitación se produce de forma casi instantánea hasta llegar a su límite crítico, y al exceder este último límite, la cavitación será severa e incontrolable hasta dañar por completo el accesorio.

Figura 11. Índice de cavitación para válvulas



Fuente: RENDÓN VARGAS, Arquímedes. *Origen de la cavitación y sus efectos en estructuras hidráulicas*. p. 62.

Para obtener el índice de cavitación, según el ingeniero César Palma, se debe relacionar el comportamiento de este en cualquier zona, conforme a las diferentes condiciones que pueden influir dentro de las válvulas, y el coeficiente de descarga que se tenga. Así pues, la ecuación es:

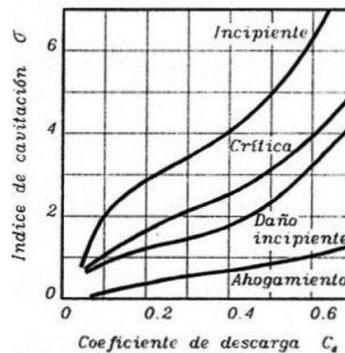
$$Cd = \frac{V}{(2g\Delta H + V^2)^{0,5}} \quad (\text{Ecuación 14})$$

Donde:

- $Cd =$ coeficiente de descarga
- $V =$ velocidad media del sistema $[m/s]$
- $\Delta H =$ diferencia de cargas antes y después de la válvula $[m]$
- $g =$ aceleración de la gravedad $[m/s^2]$

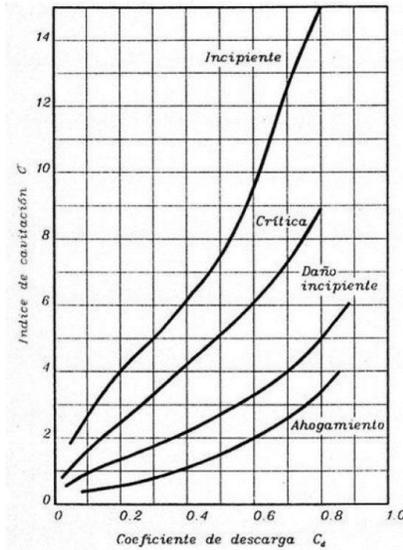
De acuerdo con investigaciones anteriores, se tendrá de apoyo las siguientes gráficas para identificar las diferentes zonas que se pueden presentar ante la cavitación en diversas válvulas. Se ilustran las zonas de límite incipiente y límite crítico, sin embargo, a estas se le añade la zona de ahogamiento, la cual consiste en la disminución total de la presión del sistema hasta la presión de vaporización en donde la válvula se ahoga, y los daños, tales como el ruido y las vibraciones, alcanzan su punto máximo.

Figura 12. Índice de cavitación en válvula de cono de 15 cm de diámetro



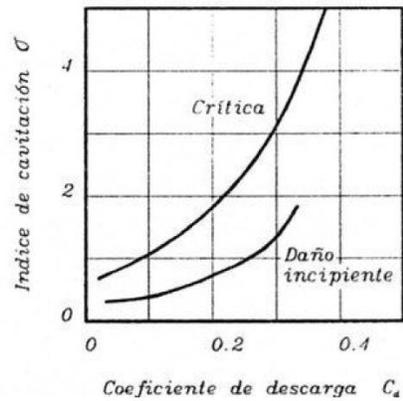
Fuente: RENDÓN VARGAS, Arquímides. *Origen de la cavitación y sus efectos en estructuras hidráulicas*. p. 112.

Figura 13. Índice de cavitación en válvula de mariposa de 15 cm de diámetro



Fuente: RENDÓN VARGAS, Arquímedes. *Origen de la cavitación y sus efectos en estructuras hidráulicas*. p. 113.

Figura 14. Índice de cavitación en una válvula de globo de 15 cm de diámetro

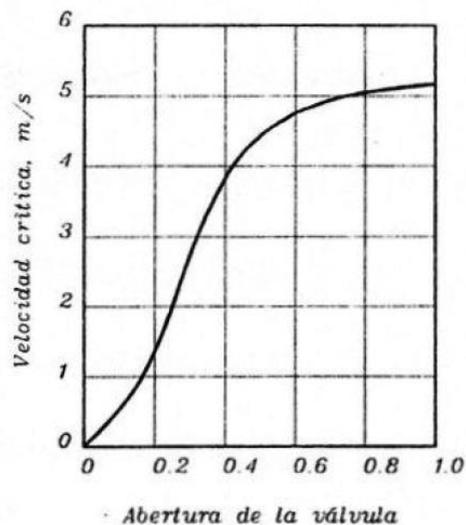


Fuente: RENDÓN VARGAS, Arquímedes. *Origen de la cavitación y sus efectos en estructuras hidráulicas*. p. 113.

Por otro parte, para las válvulas de bola y de globo, se data que existe otro criterio para evaluar la cavitación que se basan en la correlación entre las aberturas de la válvula respecto a las velocidades críticas de la misma. Se debe tener en cuenta que, si la velocidad crítica excede los parámetros, el fenómeno surgirá.

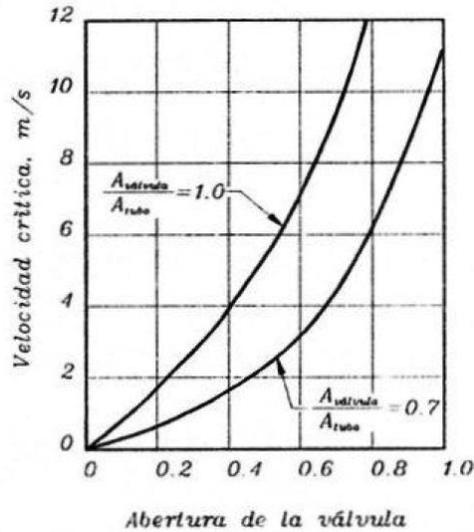
Con el apoyo de las siguientes curvas se obtendrá la velocidad crítica respecto al criterio anteriormente mencionado, según sea el caso, para el análisis de la cavitación.

Figura 15. **Predicción de la cavitación en válvulas de globo**



Fuente: RENDÓN VARGAS, Arquímedes. *Origen de la cavitación y sus efectos en estructuras hidráulicas*. p.114.

Figura 16. **Predicción de la cavitación en válvulas de bola**



Fuente: RENDÓN VARGAS, Arquímides. *Origen de la cavitación y sus efectos en estructuras hidráulicas*. p. 114.

Ahora bien, el valor de la velocidad crítica obtenida en las gráficas, deberá corregirse con alguna de las siguientes expresiones según sea el caso:

Para válvulas de globo:

$$V_c = V_{cr} \left(\frac{H_c - H_v}{51} \right)^{0,46} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Para válvulas de bola:

$$V_c = V_{cr} \left(\frac{H_c - H_v}{50} \right)^{0,46} \quad (\text{Ecuación 16})$$

Donde:

- $V_c =$ velocidad crítica útil para la válvula del proyecto [m/s]
- $V_{cr} =$ velocidad crítica obtenida de las gráficas [m/s]
- $H_c =$ carga aguas arriba de la válvula del proyecto [m]

Por último, con base en el trabajo de investigación del ingeniero César Palma, al obtener el valor de la velocidad crítica, y, por ende, el del índice de cavitación, se analiza que el comportamiento de este será inversamente proporcional a la caída de presión en el sistema. Es decir, entre mayor sea el valor de la caída de presión, la magnitud del nivel de cavitación será menor y controlable.

En adición, se deberá buscar el equilibrar la abertura con el coeficiente de descarga, ya sea al implementar una segunda válvula, para que el valor de la velocidad crítica no supere los parámetros, y el fenómeno de cavitación se modere.

2.2.4. Turbinas

Las turbinas son componentes que “Se utilizan principalmente para la obtención de la energía hidroeléctrica.”⁹ Es decir que, en este proceso, las turbinas extraen la energía del flujo proveniente del agua, para que esta se convierta en energía mecánica, y así se impulse el movimiento en los generadores eléctricos con los que se trabaje.

El fenómeno de cavitación dentro de las turbinas, surge cuando el valor de la presión absoluta se reduce a un valor igual a la presión de vapor del agua, es decir zonas bajas de presión en donde se forman las cavidades.

⁹ FRANZINI, Joseph B; FINNEMORE, E. John. *Mecánica de fluidos con aplicaciones en ingeniería*. p. 441.

Una vez, las cavidades sean arrastradas por el flujo, a zonas de alta presión, estas tenderán a condensarse momentáneamente. Según el razonamiento del científico Joseph B. Franzini en su libro *Mecánica de fluidos con aplicaciones en ingeniería*, el fenómeno dentro de las turbinas, es más notorio debido a las picaduras, vibraciones mecánicas y pérdidas de rendimiento que se manifiestan en la superficie sólida de estas.

De modo que, para determinar el parámetro de cavitación en estas, se debe emplear la ecuación:

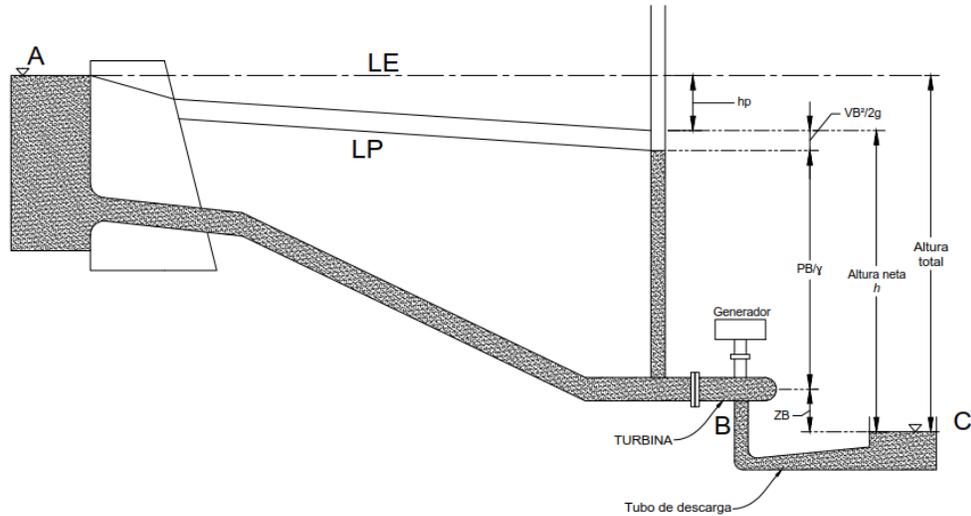
$$\sigma = \frac{P_{atm}/\gamma - P_v/\gamma - z_B}{h} \quad (\text{Ecuación 17})$$

Donde:

- h = altura neta en una turbina [m]
- z_B = elevación de la turbina desde su eje respecto del nivel del agua en la descarga [m]
- P_{atm} = presión atmosférica [N/m^2]
- P_v = presión de vapor [N/m^2]
- γ = peso específico del agua según temperatura [N/m^3]

Para una mejor visualización de las variables que influyen en este caso, se tiene la siguiente imagen.

Figura 17. Esquema para definir el coeficiente de Thoma en turbinas



Fuente: FRANZINI, Joseph B; FINNEMORE, E. John. *Mecánica de fluidos con aplicaciones en ingeniería*. p. 451.

Por otro lado, para este caso, es recomendable el hallar el punto en el que se presenta el índice de cavitación crítico (σ_c) y la altura máxima a la que debe colocarse la turbina. Ambas se deducen de la ecuación anterior. Para la cavitación crítica, no es necesario realizar ninguna modificación más allá de la toma de datos en puntos críticos, y asumir que $\sigma = \sigma_c$.

Ahora bien, para obtener la altura máxima a la que se debe ubicar la turbina, la ecuación se modifica de la siguiente forma:

$$h = \frac{P_{atm}/\gamma - P_v/\gamma - Z_B}{\sigma_c} \quad (\text{Ecuación 18})$$

Una vez calculado el valor, se examina que este dato deberá ser una medida de seguridad que garantice el funcionamiento adecuado en el cual se minimice los efectos de la cavitación.

Asimismo, el ingeniero Joseph B. Franzini, se debe calcular el valor máximo de elevación de la turbina al eje (z_B), a través de la expresión matemática:

$$z_B = \frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_v}{\gamma} - h\sigma_c \quad (\text{Ecuación 19})$$

Con este último, se podrá analizar la elevación a la cual se previene la cavitación dentro de la turbina.

De modo que, al tener todos los valores críticos necesarios de la turbina ante la cavitación, se deduce que se podrá diseñar de forma segura la conexión de las turbinas con el sistema. No obstante, este diseño no desmerita el que no se deba realizar un mantenimiento constante para evaluar si la cavitación se ha hecho presente o no.

2.2.5. Bombas

Las bombas son máquinas hidráulicas, que, a diferencia de las turbinas, transfieren energía mecánica a un fluido. Básicamente, el fluido entra en el centro del impulsor de estas, en donde es recogido por el mismo, girando o rodando. Luego, el fluido gira con el impulsor hasta provocar las fuerzas que moverán el fluido radialmente hacia afuera, ocasionando que este se desplace hasta el puerto de descarga.¹⁰

¹⁰ GUEVARA CASTILLO, Francisco Javier et al. *Potencia fluida*. p. 107-108.

Tras una revisión de la información recabada, se identifica que “un factor importante para el funcionamiento satisfactorio de una bomba es evitar la cavitación, tanto para obtener un buen rendimiento como para evitar daños en el impulsor.”¹¹ Es decir, en el diseño hidráulico, si se implementa una bomba, se deberá verificar o limitar los puntos críticos en los que la cavitación se hace presente, para procurar prevenir los efectos nocivos de dicho fenómeno.

Generalmente, la cavitación surge cuando el líquido pasa por el impulsor de una bomba y se produce un cambio de presión, en el cual, como se ha indicado anteriormente, si la presión absoluta del fluido cae por debajo de la presión de vapor, se manifiesta el fenómeno. Según se data en trabajos previos, la cavitación dentro de las bombas suele impactar con más frecuencia en la salida de los impulsores de la bomba o en los extremos de los álabes.

Para analizar el índice de cavitación en las bombas se define que:

$$\sigma = \frac{P_{abs}/\gamma + V_{as}^2/2g - P_v/\gamma}{h} \quad \text{(Ecuación 20)}$$

Donde:

- P_{as} = presión de aspiración de la bomba $[N/m^2]$
- h = altura desarrollada por la bomba $[m]$
- P_v = presión de vapor $[N/m^2]$
- V_{as} = velocidad de aspiración de la bomba $[m/s]$

¹¹ FRANZINI, Joseph B; FINNEMORE, E. John. *Mecánica de fluidos con aplicaciones en ingeniería*. p. 428-429.

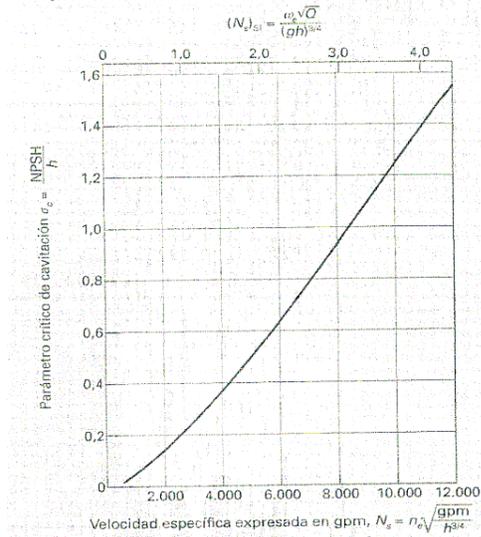
Al realizar un pequeño análisis, la ecuación anterior se puede expresar de una mejor forma como:

$$\sigma = \frac{NPSH}{h} \quad (\text{Ecuación 21})$$

En el capítulo anterior, la altura de aspiración neta positiva (*NPSH*), se expone con más detalle. Por otra parte, y nuevamente, se deberá hallar un valor crítico (σ_c) que permita identificar el comienzo de la cavitación dentro de la bomba. Se considera que estos dependerán del tipo de bomba y de las condiciones de funcionamiento. Y, cabe señalar que, algunos de los primeros indicios del fenómeno se tendrán a partir de la presencia del ruido y la vibración, producidos por el colapso de las burbujas.

Según el ingeniero Joseph B. Franzini, el valor del índice de cavitación crítico variará conforme al caudal. Se podrán hallar valores de este a través de la siguiente figura, la cual se basa en el funcionamiento de las bombas centrífugas en condiciones normales cerca de su rendimiento máximo.

Figura 18. **Parámetro crítico de cavitación en función de la velocidad específica**



Fuente: FRANZINI, Joseph B FINNEMORE, E. John. *Mecánica de fluidos con aplicaciones en ingeniería*. p. 441.

Se examina que, al incrementar la velocidad específica, el índice de cavitación crítico también aumentará, por lo que, se sugiere considerar todos los escenarios posibles, al momento del diseño hidráulico, en los que dicha velocidad tiende a elevarse demasiado.

Como se ha analizado anteriormente, para evitar el fenómeno de cavitación dentro de la bomba, se debe cumplir con la condición de que $\sigma > \sigma_c$. No obstante, se establece que, en ciertas situaciones, esta condición tenderá a *no* cumplirse. Y, según, la información recabada, son:

- Grandes alturas de bombeo.
- Presión atmosférica baja.

- Grandes pérdidas de carga entre el depósito fuente y la bomba.
- Grandes magnitudes de elevación, entre la superficie del agua del depósito respecto con la bomba.
- Valores grandes de presión de vapor, en el los cuales la temperatura será alta y variada.

Para controlar las situaciones anteriores, se debe definir un límite de altura requerida en donde se sitúe la bomba. Durante el diseño, se sugiere llevar a cabo el minimizar la pérdida total de carga (h_p), tras situar dicha bomba lo más cercano al depósito fuente, como prevención. Teniendo un valor preciso de σ_c , la máxima elevación (Z_{as}) se puede determinar utilizando la ecuación:

$$(Z_{as})_{m\acute{a}x} = \frac{(P_o)_{abs}}{\gamma} - \frac{P_v}{\gamma} - \sigma_c h - h_p \quad (\text{Ecuación 22})$$

Se infiere que, si la elevación con la que se diseñará es menor que al valor obtenido de $(Z_{as})_{m\acute{a}x}$, los efectos de cavitación no serán nocivos dentro del sistema de bombeo. Cabe destacar que durante el diseño hidráulico se deben emplear gráficas, elaboradas en previos trabajos de investigación, como parámetro para limitar la altura requerida conforme a la velocidad específica.

3. MÉTODO DE EVALUACIÓN

Con el objetivo de comprobar el fenómeno de cavitación dentro de los conductos a presión, se diseñó un modelo hidráulico a escala, con materiales de venta accesible. Este se construyó dentro del laboratorio de mecánica de fluidos dentro de la Facultad de Ingeniería. A continuación, se detalla el procedimiento de la experimentación.

3.1. Instrumentos utilizados para el modelo de laboratorio

El modelo hidráulico inicia con la instalación de un banco hidráulico, seguido de 3 tramos a diferentes niveles, de tubería PVC y manguera transparente; estos se unen por codos a 45° de PVC. Dentro de los tres tramos se conectan seis racores, los cuales permiten la implementación de seis mangueras de 3/8" de diámetro, que, como finalidad, se conectan al tablero de los piezómetros, para medir las pérdidas dentro del sistema.

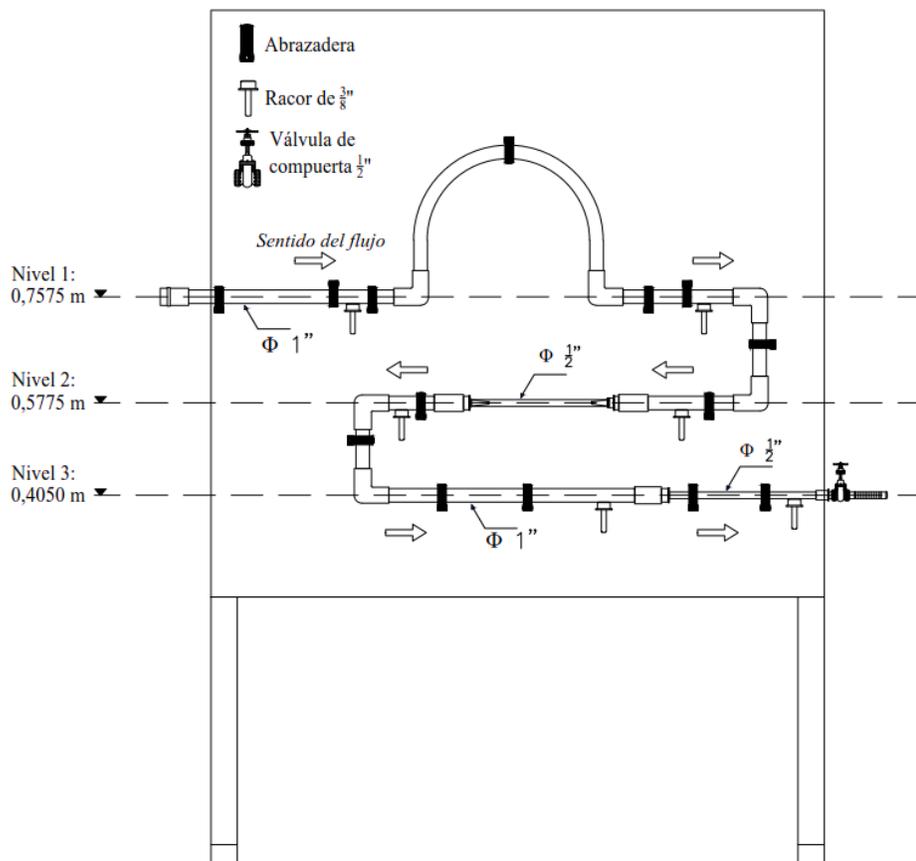
La primera parte se compone de un inicio con tubería PVC de 1 pulgada, luego se encuentra una conexión de manguera transparente en posición cóncava de 1 pulgada, la cual simula un sifón, y finaliza con un conducto de PVC del mismo diámetro.

En el segundo nivel, y utilizando una unión con codos a 45° con el primer tramo, se localiza la tubería PVC de 1 pulgada, seguido, se realiza un cambio de diámetro de ½ pulgada, utilizando manguera transparente (con el fin de observar el fenómeno de cavitación en esta parte).

Nuevamente, se implementa un cambio de diámetro a 1 pulgada con un conducto PVC. En el tercer tramo, no se emplea manguera solo tubería PVC con una variación de diámetro de 1 pulgada a ½ pulgada.

Al finalizar dicho tramo, este se conecta a una válvula de compuerta, con la cual se regula el flujo dentro de los conductos. Por último, dicha válvula se conecta una manguera que devuelve el líquido al banco hidráulico. A continuación, para mejor visualización se diagrama el modelo empleado:

Figura 19. **Modelo de cavitación empleado**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2018.

Figura 20. **Instalación completa de sistema hidráulico en laboratorio**



Fuente: elaboración propia.

Se resalta que, en el primer tramo la manguera que simula el sifón, se varía la altura de este durante la experimentación, con el fin de comprobar la susceptibilidad de la aparición del fenómeno de cavitación dentro de este punto en específico.

3.2. Tipos de obstáculos en sistemas de conductos a presión

Las obstrucciones relacionadas, aplicadas a este modelo a nivel de escala en laboratorio, se fundamentan en el comportamiento de las presiones que se producen dentro de las mismas, y se toma como referencia la figura 19.

3.2.1. Retorno o curva en U (sifón)

Los sifones (nivel 1) se identifican como un obstáculo debido a que, como lo señala Joseph B. Franzini en su libro *Mecánica de fluidos con aplicaciones en ingeniería*, luego de que el flujo pasa por la curvatura en U, las pérdidas que se producen en este punto continúan más allá de dicha curvatura; a lo que se atribuye que se den las condiciones necesarias para que el fenómeno de cavitación sea más propenso a originarse y prolongarse a lo largo del sistema.

3.2.2. Constricción y dilatación simultánea

La constricción y dilatación simultáneas (nivel 2) se identifican como una obstrucción debido a que el cambio repentino de diámetro en la tubería que existe dentro del modelo, ocasiona, por inferencia de principios hidráulicos según el análisis del ingeniero Claudio Mataix, un cambio de aumento y disminución de la velocidad del flujo, bastante brusco. Como consecuencia, las presiones son superiores en ese tramo, dando lugar a la formación de la cavitación, y su propagación dentro del sistema.

3.2.3. Constricción súbita

Siguiendo con el razonamiento expuesto por el ingeniero Joseph B. Franzini, en conjunto con su colega E. John Finnemore, la pérdida que se origina en este fragmento (nivel 3) tiende a ser lo suficientemente pronunciada debido al incremento abrupto de la velocidad y turbulencia dentro del fluido. Por ello, se infiere que, gracias a dicho aumento, la caída de presión que se deriva de este tramo es considerablemente grande para afectar la salida del fluido en el sistema, y, las respectivas pérdidas acumuladas.

3.3. Equipo para la medición de parámetros de la cavitación

Para la obtención de datos se utilizó el siguiente equipo:

- Banco hidráulico: elemento móvil que contiene una bomba centrífuga y una válvula para hacer circular el fluido. También, contiene una probeta cilíndrica graduada para medir caudales.

Figura 21. **Banco hidráulico**



Fuente: Edibon. *Banco hidráulico*. <https://www.edibon.com/es/equipment/hydraulics-bench>.

Consulta: 03 de enero de 2020.

- Cronómetro: dispositivo empleado para la medición de fracciones de tiempo en intervalos pequeños.

Figura 22. **Cronómetro digital**

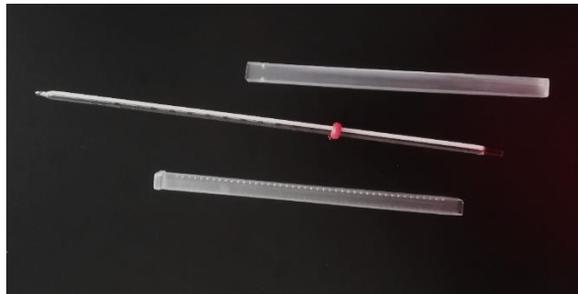


Fuente: Murcmejor. *Mejor cronómetro Casio*. <https://murcmejor.com/mejor-cronometro-casio/amp>.

Consulta: 03 de enero de 2020.

- Termómetro: dispositivo que se emplea para medir la temperatura del fluido en estudio.

Figura 23. **Termómetro de laboratorio**



Fuente: elaboración propia.

- Tabla de piezómetros: instrumento graduado para medir las pérdidas de energía por fricción dentro de los conductos con flujo a presión.

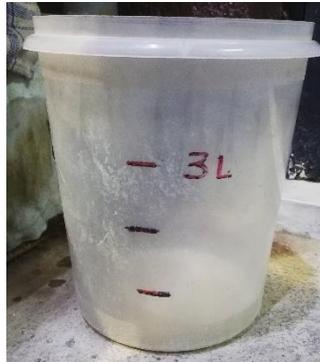
Figura 24. **Tablero de piezómetros**



Fuente: elaboración propia.

- Cubeta: elemento empleado para aforar con un volumen conocido.

Figura 25. **Cubeta**



Fuente: elaboración propia.

3.4. Procedimiento para evaluación y recopilación de datos

El conjunto de procedimientos que se realizó para hacer funcionar el modelo hidráulico, y recopilar los datos necesarios para el análisis, se describe en los siguientes incisos.

3.4.1. Procedimiento experimental

Consistió en:

- Llenar el depósito de agua, el cual hará circular el agua dentro del sistema de tuberías.
- Conectar el banco hidráulico al punto de inicio del modelo.

- Acoplar las mangueras destinadas del modelo en el tablero de los piezómetros.
- Regular la válvula del banco hidráulico que permite la circulación de un caudal con carga constante.
- Ajustar la válvula de compuerta a un caudal constante en los conductos a presión.
- Adecuar las alturas de los piezómetros en el tablero de control para iniciar las mediciones.
- Al variar el caudal, registrar cinco veces la lectura en los piezómetros.
- En cada variación de flujo, aforar cinco veces el caudal en las tuberías de ensayo.
- Registrar la temperatura del agua.

Como nota, el procedimiento anterior, se realiza para cada modificación de altura en la manguera cóncava.

3.4.2. Método de aforo

Durante la experimentación, se emplea un aforo volumétrico, el cual consiste en la medición del tiempo de llenado de un recipiente de volumen conocido, donde se recolecta la descarga. El procedimiento es:

- Graduar la válvula de compuerta para mantener un caudal constante.

- Ajustar el cronometro para iniciar las corridas.
- Colocar la manguera de salida en el recipiente de volumen conocido, al mismo tiempo, que se inicia el cronómetro.
- Registrar cinco veces el tiempo de aforo, para mayor precisión en la toma de datos.

Nuevamente, por cada cambio de altura en el sifón (manguera), se repite la técnica de aforo anterior.

3.5. Descripción del programa de Microsoft Office Excel 2016

El programa Microsoft Office Excel 2016, permite la ejecución de operaciones contables, financieras, organizativas y programación a través de hojas de cálculo. Dentro de las funciones de Excel está la gestión de tablas, formatos, fórmulas matemáticas y la creación de gráficos, según lo requiera el usuario.

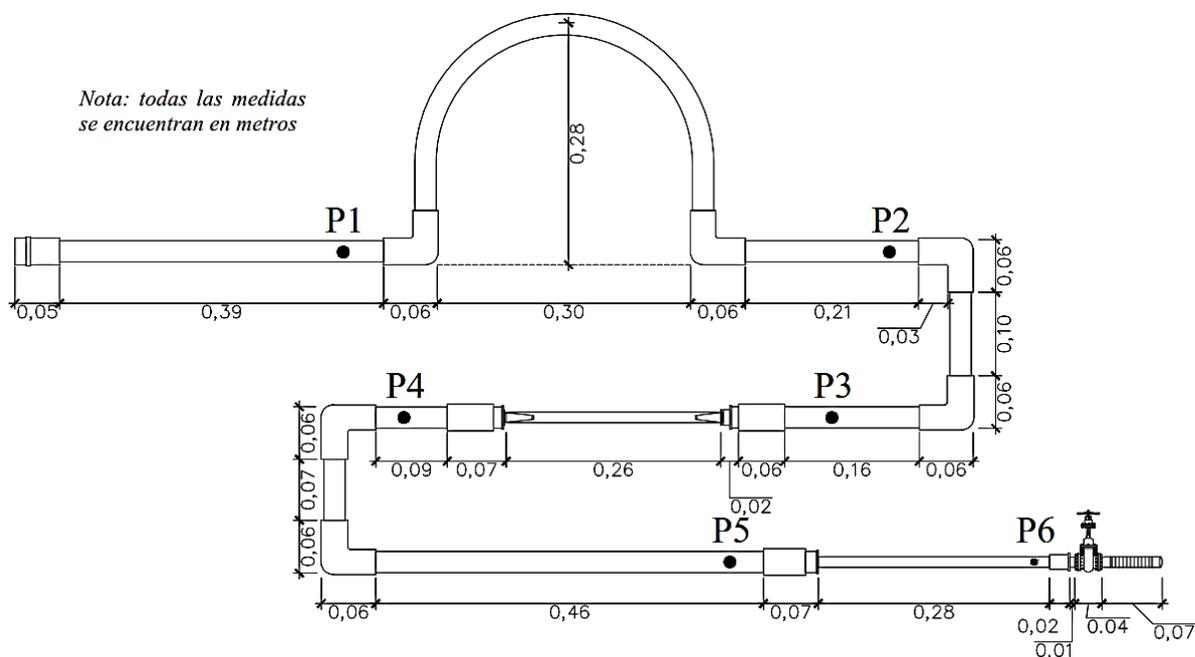
Para este estudio el software de Excel permite la agilización de los cálculos por realizar para cumplir con los objetivos del presente trabajo, y para obtener valores lo más precisos posibles.

3.5.1. Determinación del parámetro de cavitación

Al realizar todas las corridas correspondientes, y recopilar los datos de la mismas, se identificaron puntos críticos en donde debe analizarse las presiones actuantes para identificar si hubo cavitación dentro de estos.

El siguiente procedimiento es repetitivo para cada variación de altura en los sifones. Por lo tanto, para el desarrollo de cada inciso se utilizarán solamente los datos de la primera variación, pero aparecen tabulados el resto de datos de las tres variaciones. El esquema con medidas a utilizar es el siguiente:

Figura 26. Variación de altura de sifón I



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2018.

La secuencia de análisis para el parámetro de cavitación es la siguiente:

3.5.1.1. Datos iniciales

Los datos generales en el sistema son:

Tabla I. Datos generales

DATOS DEL SISTEMA	
Altura de bomba a entrada de tubería (h):	0,460 m
Gravedad:	9,81 m/s ²
Material de tubería:	Plástico (PE/PVC)
Rugosidad de tubería(ϵ)	0,00150

DÍAMETRO DE TUBERÍAS EMPLEADAS	
ϕ_1 Tubería:	1 "
Área Tubería ϕ_1 :	0,000506707 m ²
D:	25 mm
ϕ_2 Tubería:	1/2"
Área Tubería ϕ_2 :	0,000126677 m ²
D:	12 mm

DATOS DEL LÍQUIDO UTILIZADO	
Líquido:	Agua
Temperatura:	21°C
Viscosidad:	9,85E-07 m ² /s
Densidad:	0,9978
Peso específico (γ):	9 800 N/m ³

DATOS DE PRESIONES ACTUANTES	
$P_{atmosférica}$:	101 300 N/m ²
$P_{atmosférica}/\gamma$:	10,337 m

A través de la temperatura del agua se obtiene la presión de vapor (P_v)

P_v absoluta:	2 485 N/m ²
P_v relativa:	98 815 N/m ²

NIVELES EN TRAMOS	
Nivel 1:	0,7575 m
Nivel 2:	0,5775 m
Nivel 3:	0,4050 m

ALTURAS DE SIFONES	
Sifón	Z_{inter} (m)
I	0,275
II	0,365
III	0,460

Fuente: elaboración propia.

Al finalizar el ensayo se obtienen las lecturas en los piezómetros medidos y los datos de aforo, los cuales tabulados son:

- Sifón I

Tabla II. **Lectura de piezómetros y datos de aforo (sifón I)**

SIFÓN I						
Lecturas de piezómetros: Sifón I (m)						
Corrida	P₁	P₂	P₃	P₄	P₅	P₆
1	1,3950	1,3825	1,2775	1,2425	1,2250	1,1975
2	1,3650	1,3450	1,3175	1,1975	1,1525	1,0950
3	1,3500	1,3250	1,2850	1,0925	0,9950	0,9175
4	1,1850	1,1325	1,1175	0,7350	0,5175	0,3550
5	1,1750	1,0850	0,9925	0,4250	0,3450	0,1025

Tiempos de aforo: Sifón I (s)						
Corrida	Volumen	T₁	T₂	T₃	T₄	T₅
1	3 L	66,40	65,65	65,65	65,88	65,31
2	3 L	31,96	31,28	31,84	32,18	32,25
3	5 L	33,25	33,85	33,72	35,65	34,81
4	5 L	21,09	22,28	21,97	21,84	22,72
5	5 L	18,09	17,12	17,68	17,78	17,25

Fuente: elaboración propia.

- Sifón II

Tabla III. **Lecturas de piezómetros y datos de aforo (sifón II)**

SIFÓN II						
Lecturas de piezómetros: Sifón II (m)						
Corrida	P₁	P₂	P₃	P₄	P₅	P₆
1	1,4400	1,4325	1,4025	1,3375	1,2750	1,2450
2	1,3700	1,3500	1,3250	1,0400	0,9550	0,8575
3	1,2050	1,1700	1,1500	0,8025	0,7025	0,5325
4	1,1800	1,1200	1,0550	0,5575	0,4700	0,2250
5	1,1475	1,0725	1,0375	0,4450	0,4325	0,1400

Continuación tabla III.

Tiempos de aforo: Sifón II (s)						
Corrida	Volumen	T₁	T₂	T₃	T₄	T₅
1	3 L	46,82	45,07	45,34	45,31	45,15
2	5 L	30,00	30,09	31,78	32,56	30,35
3	5 L	24,63	24,54	25,28	24,59	24,31
4	5 L	18,81	18,75	18,81	17,63	18,38
5	5 L	16,41	16,57	16,82	17,59	16,53

Fuente: elaboración propia.

- Sifón III

Tabla IV. **Lecturas de piezómetros y datos de aforo (sifón III)**

SIFÓN III						
Lecturas de piezómetros: Sifón III (m)						
Corrida	P₁	P₂	P₃	P₄	P₅	P₆
1	1,3450	1,3275	1,2850	1,2275	1,1875	1,1625
2	1,2750	1,2350	1,1200	0,9675	0,8850	0,8175
3	1,1275	1,0750	1,0450	0,7475	0,5975	0,4800
4	1,0525	0,9650	0,9550	0,4925	0,3000	0,1275
5	1,0125	0,8925	0,8625	0,3075	0,2825	0,0650

Tiempos de aforo: Sifón III (s)						
Corrida	Volumen	T₁	T₂	T₃	T₄	T₅
1	3 L	52,37	50,90	51,03	51,31	50,72
2	3 L	27,97	28,66	28,69	28,50	28,31
3	5 L	27,84	27,47	27,69	28,37	29,22
4	5 L	22,16	22,03	21,62	22,28	21,72
5	5 L	18,06	18,44	18,54	18,69	19,50

Fuente: elaboración propia.

3.5.1.2. Cálculos hidráulicos preliminares

Con los datos anteriores, se realizan los siguientes procedimientos, para cada par de lecturas y datos de aforo correspondientes.

- Pérdidas de energía

Para las pérdidas de energía se emplea la ecuación:

$$h_f = (Lectura_{P_1} - Lectura_{P_2}) [m] \quad (\text{Ecuación 23})$$

Entonces, tomando los datos de la tabla II, y utilizando la ecuación anterior se tiene:

$$Lectura_{P_1} = 1,3950 \text{ m}$$

$$Lectura_{P_2} = 1,3825 \text{ m}$$

$$h_f = (Lectura_{P_1} - Lectura_{P_2})$$

$$h_f = (1,3950 - 1,3825) \text{ m}$$

$$h_f = 0,0125 \text{ m}$$

- Caudal

A partir de los datos de la primera corrida 1 de la tabla II se procede a calcular el tiempo total, con la ecuación:

$$T_{total} = \left(\sum t \right) [s] \quad (\text{Ecuación 24})$$

El registro de los tiempos es:

$$T_1 = 66,40 \text{ s}$$

$$T_2 = 65,65 \text{ s}$$

$$T_3 = 65,65 \text{ s}$$

$$T_4 = 65,88 \text{ s}$$

$$T_5 = 65,31 \text{ s}$$

Entonces:

$$T_{total} = \sum t$$

$$T_{total} = (66,40 + 65,65 + 65,65 + 65,88 + 65,31) \text{ s}$$

$$T_{total} = 65,78 \text{ s}$$

Con el tiempo total calculado se procede a deducir el caudal dentro de cada corrida. Tomando el sistema hidráulico a escala como un sistema en serie; según Claudio Mataix en su libro *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*, en las tuberías en serie el caudal tenderá a ser el mismo en todo el modelo.

Entonces, la ecuación que se emplea para poder obtener el valor del caudal es:

$$Q = \frac{\text{Volumen}}{1\,000 * T_{total}} \left[m^3/s \right] \quad (\text{Ecuación 25})$$

Por lo tanto:

$$Q = \frac{\text{Volumen}}{1\,000 * T_{total}}$$

$$Q = \frac{5 \text{ L}}{1\,000 * 65,78 \text{ s}}$$

$$Q = 0,000046 \text{ m}^3/s$$

- Velocidad

La velocidad dentro de los diferentes niveles del sistema para esta primera corrida, se emplea la ecuación:

$$V = \frac{Q}{\text{Área de Tubería}} \text{ [m/s]} \quad (\text{Ecuación 26})$$

Para el nivel 1 y 2, se utiliza el área del diámetro 1”:

$$V = \frac{Q}{\text{Área de Tubería}} = \frac{Q}{\pi D^2 / 4}$$

$$V = \frac{0,000046}{\pi (1'' * 2,54 * 1/100)^2 / 4}$$

$$V_{1,y2} = 0,0900 \text{ m/s}$$

Para el nivel 3, se utiliza el área del diámetro menor, de 1/2”:

$$V = \frac{Q}{\text{Área de Tubería}} = \frac{Q}{\pi D^2 / 4}$$

$$V = \frac{0,000046}{\pi (1/2'' * 2,54 * 1/100)^2 / 4}$$

$$V_3 = 0,3600 \text{ m/s}$$

- Energía cinética

La energía cinética está dada por la expresión matemática:

$$E.C = \frac{V^2}{2g} [m] \quad (\text{Ecuación 27})$$

Así que para la primera corrida en los piezómetros 1 y 2, se deduce que la energía cinética es:

$$E.C = \frac{V^2}{2g}$$

$$E.C = \frac{(0,0900 \text{ m/s})^2}{2(9,81 \text{ m/s}^2)}$$

$$E.C = 0,000413 \text{ m}$$

Al terminar los cálculos preliminares hidráulicos, se tabulan los datos finales de cada sifón, y se genera una gráfica por cada variación, que muestre el comportamiento lineal entre las pérdidas y la energía cinética. Los resultados son:

- Tiempo total y caudal

Tabla V. **Tiempo total y caudal**

Variación	Sifón III		Sifón III		Sifón III	
	T _{total} (s)	Q (m ³ /s)	T _{total} (s)	Q (m ³ /s)	T _{total} (s)	Q (m ³ /s)
1	65,78	0,000046	45,54	0,000066	51,27	0,000059
2	31,90	0,000094	30,96	0,000162	28,43	0,000106
3	34,26	0,000146	24,67	0,000203	28,12	0,000178
4	21,98	0,000227	18,48	0,000271	21,96	0,000228
5	17,58	0,000284	16,78	0,000298	18,65	0,000268

Fuente: elaboración propia.

- Pérdidas en piezómetros 1 y 2 (retorno en U)

Los datos tabulados son:

Tabla VI. **Pérdidas hf1 en sifón I**

SIFÓN I				
Corrida	hf1 (P1 - P2)	Q (m³/s)	V(m/s)	Energía cinética (m)
1	0,0125	0,000046	0,0900	0,000413
2	0,0200	0,000094	0,1856	0,001756
3	0,0250	0,000146	0,2881	0,004231
4	0,0525	0,000227	0,4489	0,010276
5	0,0900	0,000284	0,5612	0,016056

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Pérdidas hf1 en sifón II**

SIFÓN II				
Corrida	hf1 (P1 - P2)	Q (m³/s)	V(m/s)	Energía cinética (m)
1	0,0075	0,000066	0,1300	0,000862
2	0,0200	0,000162	0,3188	0,005181
3	0,0350	0,000203	0,4000	0,008157
4	0,0600	0,000271	0,5341	0,014543
5	0,0750	0,000298	0,5879	0,017623

Fuente: elaboración propia.

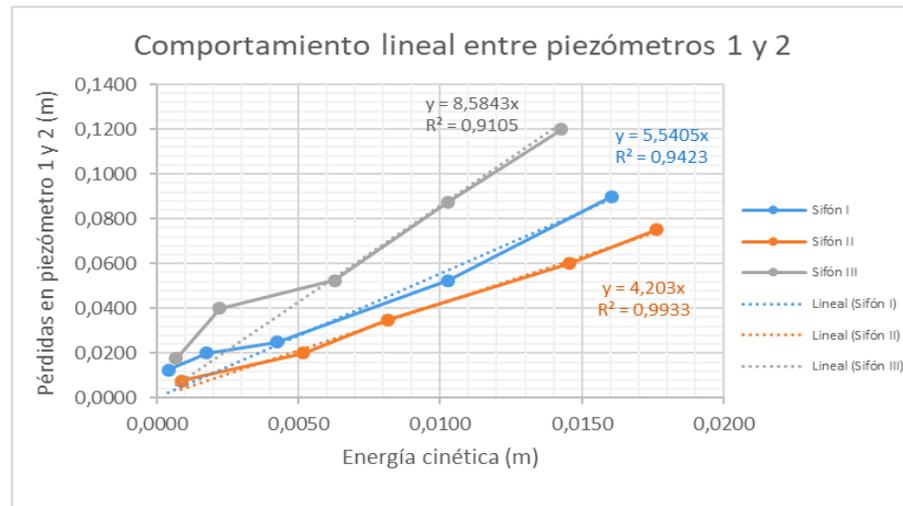
Tabla VIII. **Pérdidas hf1 en sifón III**

SIFÓN III				
Corrida	hf1 (P1 - P2)	Q (m³/s)	V(m/s)	Energía cinética (m)
1	0,0175	0,000059	0,1155	0,000680
2	0,0400	0,000106	0,2083	0,002212
3	0,0525	0,000178	0,3509	0,006279
4	0,0875	0,000228	0,4493	0,010293
5	0,1200	0,000268	0,5292	0,014279

Fuente: elaboración propia.

La gráfica de comportamiento lineal final, entre las pérdidas de hf_1 y la energía cinética calculada, en cada variación es:

Figura 27. **Gráfico de comportamiento lineal de pérdidas hf1**



Fuente: elaboración propia.

- Pérdidas en piezómetro 3 y 4 (constricción y dilatación simultáneas)

Los datos tabulados son:

Tabla IX. **Pérdidas hf2 en sifón I**

SIFÓN I				
Corrida	$hf_2 (P_3 - P_4)$	Q (m ³ /s)	V(m/s)	Energía cinética (m)
1	0,0350	0,000046	0,0900	0,00041
2	0,1200	0,000094	0,1856	0,00176
3	0,1925	0,000146	0,2881	0,00423
4	0,3825	0,000227	0,4489	0,01028
5	0,5675	0,000284	0,5612	0,01606

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Pérdidas hf2 en sifón II**

SIFÓN II				
Corrida	hf2 (P ₃ - P ₄)	Q (m ³ /s)	V(m/s)	Energía cinética (m)
1	0,0650	0,000066	0,1300	0,00086
2	0,2850	0,000162	0,3188	0,00518
3	0,3475	0,000203	0,4000	0,00816
4	0,4975	0,000271	0,5341	0,01454
5	0,5925	0,000298	0,5879	0,01762

Fuente: elaboración propia.

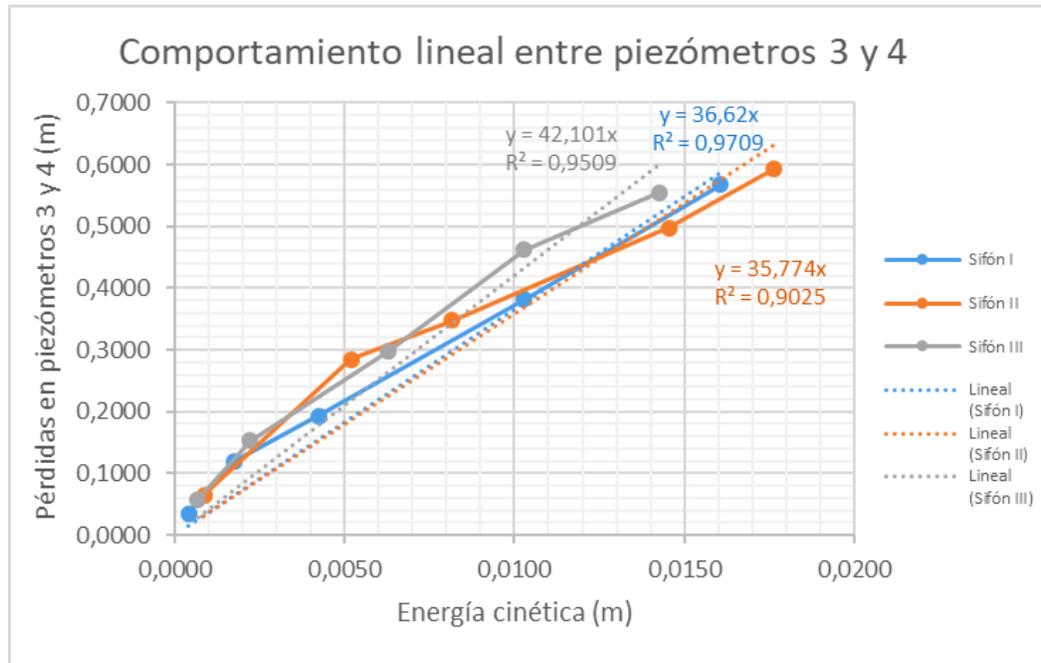
Tabla XI. **Pérdidas hf2 en sifón III**

SIFÓN III				
Corrida	hf2 (P ₃ - P ₄)	Q (m ³ /s)	V(m/s)	Energía cinética (m)
1	0,0575	0,000059	0,1155	0,00068
2	0,1525	0,000106	0,2083	0,00221
3	0,2975	0,000178	0,3509	0,00628
4	0,4625	0,000228	0,4493	0,01029
5	0,5550	0,000268	0,5292	0,01428

Fuente: elaboración propia.

La gráfica de comportamiento lineal final, entre las pérdidas de hf2 y la energía cinética calculada, en cada variación es:

Figura 28. Gráfico de comportamiento lineal de pérdidas hf2



Fuente: elaboración propia.

- Pérdidas en piezómetro 5 y 6 (constricción súbita)

Los datos tabulados son:

Tabla XII. Pérdidas hf3 en sifón I

SIFÓN I				
Corrida	hf ₃ (P ₅ - P ₆)	Q (m ³ /s)	V(m/s)	Energía cinética (m)
1	0,0275	0,000046	0,3600	0,006609
2	0,0575	0,000094	0,7423	0,028097
3	0,0775	0,000146	1,1522	0,067690
4	0,1625	0,000227	1,7957	0,164414
5	0,2425	0,000284	2,2447	0,256897

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. Pérdidas hf3 en sifón II

SIFÓN II				
Corrida	hf3 (P5 - P6)	Q (m ³ /s)	V(m/s)	Energía cinética (m)
1	0,0300	0,000066	0,5201	0,013790
2	0,0975	0,000162	1,2751	0,082891
3	0,1700	0,000203	1,5999	0,130514
4	0,2450	0,000271	2,1363	0,232691
5	0,2925	0,000298	2,3517	0,281971

Fuente: elaboración propia.

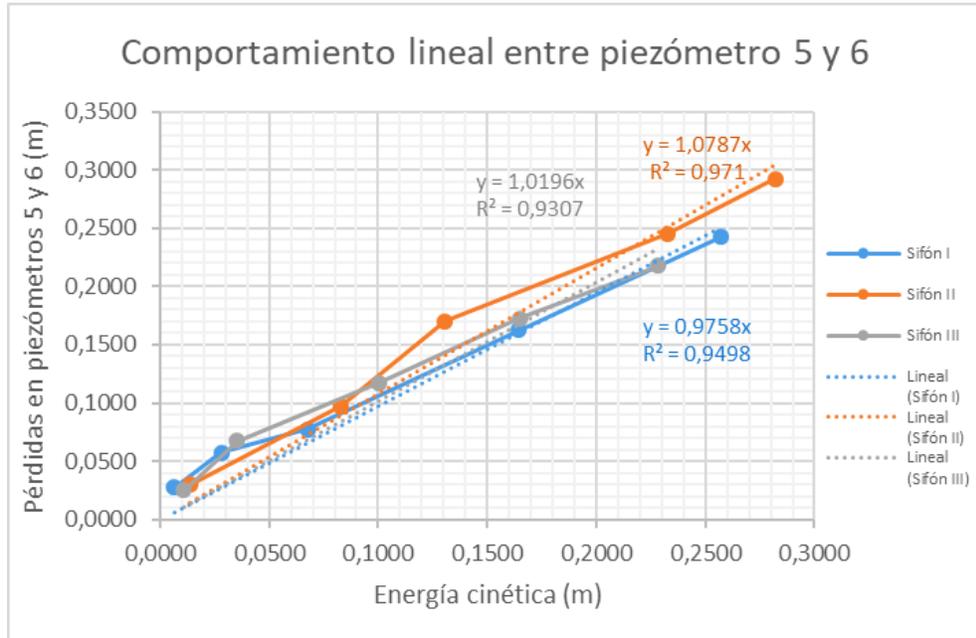
Tabla XIV. Pérdidas hf3 en sifón III

SIFÓN III				
Corrida	hf3 (P5 - P6)	Q (m ³ /s)	V(m/s)	Energía cinética (m)
1	0,0250	0,000059	0,4619	0,010880
2	0,0675	0,000106	0,8331	0,035389
3	0,1175	0,000178	1,4037	0,100468
4	0,1725	0,000228	1,7972	0,164684
5	0,2175	0,000268	2,1168	0,228467

Fuente: elaboración propia.

La gráfica de comportamiento lineal final, entre las pérdidas de hf3 y la energía cinética calculada, en cada variación es:

Figura 29. Gráfico de comportamiento lineal de pérdidas hf3



Fuente: elaboración propia.

Al obtener el comportamiento lineal de las pérdidas en cada relación de piezómetros, y por cada variación de altura, se adquiere la ecuación lineal que permite conocer el coeficiente k experimental de las pérdidas presentes en el sistema. De forma tabulada, las pendientes lineales son:

Tabla XV. Valores del coeficiente k según niveles de análisis

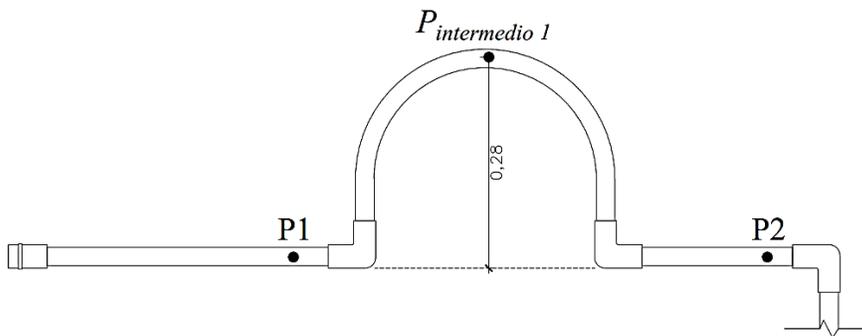
Análisis	Pendiente lineal (x)		
	Sifón I	Sifón II	Sifón III
Retorno en U	5,541	4,203	8,584
Constricción y dilatación simultánea	36,620	35,774	42,101
Constricción súbita	0,976	1,079	1,020

Fuente: elaboración propia.

3.5.1.3. Cálculos en retorno en U (nivel 1)

Utilizando el diagrama de la primera parte del sistema hidráulico, como referencia:

Figura 30. Esquema del modelo hidráulico, nivel 1



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2018.

Utilizando la ecuación de Bernoulli entre los piezómetros 1 y 2, se determina la presión en el punto intermedio 1 del sifón (retorno en U), con el objetivo de verificar que dicha presión sea menor a la presión relativa de vapor dentro del sistema. Entonces:

$$z_1 + \frac{p_1 \text{ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \left(z_{inter} + \frac{p_{inter\ 1\ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_{inter}^2}{2g} \right) + hf$$

$$z_1 + \frac{p_1 \text{ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \left(z_{inter} + \frac{p_{inter\ 1\ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_{inter}^2}{2g} \right) + k \frac{V_{inter}^2}{2g}$$

Para despejar la presión intermedia absoluta, se tiene como valores iniciales:

$$z_1 = 0 \text{ m}$$

$$z_{intermedia\ 1} = 0,28 \text{ m}$$

$$k = \text{valor de la tabla XV} = x = 5,541$$

Entonces, se sustituyen los valores:

$$0 + \frac{p_{1\ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \left(z_{inter} + \frac{p_{inter\ 1\ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_{inter}^2}{2g} \right) + (x/2) \frac{V_{inter}^2}{2g}$$

La ecuación final sería:

$$\frac{p_{inter\ 1\ absoluta}}{\gamma} = \frac{p_{1\ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} - z_{inter} - \frac{V_{inter}^2}{2g} - (2,770) \frac{V_{inter}^2}{2g} \quad \text{Ecuación (28)}$$

Al obtener la ecuación anterior, se ejecuta la sustitución de valores.

- Presiones absolutas: para que las presiones obtenidas dentro de los piezómetros sean absolutas, deberá sumársele la presión atmosférica dividida dentro del peso específico del agua. Además, a la presión del piezómetro se debe restar el nivel de ese tramo. Los datos y su procedimiento es el siguiente:

$$\frac{p_{atmosférica}}{\gamma_{Agua}} = 10,337 \text{ N/m}^2$$

$$\frac{p_{1\ relativa}}{\gamma} = 1,3950 \text{ m}$$

$$\text{Nivel 1} = 0,7575 \text{ m}$$

Se emplea la sumatoria:

$$\frac{p_{1 \text{ absoluta}}}{\gamma} = \left(\frac{p_{1 \text{ relativa}}}{\gamma} - \text{Nivel 1} \right) + \frac{p_{\text{atmosférica}}}{\gamma_{\text{Agua}}}$$

$$\frac{p_{1 \text{ absoluta}}}{\gamma} = (1,3950 - 0,7575) m + 10,337 m$$

$$\frac{p_{1 \text{ absoluta}}}{\gamma} = 0,6375 m + 10,337 m$$

$$\frac{p_{1 \text{ absoluta}}}{\gamma} = 10,97 m$$

Este paso, se realiza en cada presión absoluta dentro de la ecuación.

- Presión intermedia absoluta: para llevar a cabo la ecuación No. 28, se emplean los valores en las tablas de la sección 3.5.1.1 y 3.5.1.2.

$$\begin{aligned} \frac{p_{\text{inter 1 absoluta}}}{\gamma} &= \frac{p_{1 \text{ absoluta}}}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} - z_{\text{inter}} - \frac{V_{\text{inter}}^2}{2g} - 2,770 \frac{V_{\text{inter}}^2}{2g} \\ &= 10,97 m + \frac{(0,0900 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} - 0,28 m - \frac{(0,0900 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} - 2,770 \left[\frac{(0,0900 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} \right] \end{aligned}$$

$$\frac{p_{\text{inter 1 absoluta}}}{\gamma} = 10,70 m$$

Obteniendo la presión intermedia absoluta:

$$p_{\text{inter 1 absoluta}} = 10,70 m * \gamma$$

$$p_{\text{inter 1 absoluta}} = 10,70 m * 9 800 \text{ N/m}^3$$

$$p_{\text{inter 1 absoluta}} = 104 841 \text{ N/m}^2$$

- Presión intermedia relativa: una vez calculada la presión absoluta intermedia, se debe restar la presión atmosférica con el fin de obtener la presión intermedia relativa.

$$p_{inter\ 1\ absoluta} = 104\ 841\ \text{N/m}^2 - p_{atmosférica}$$

$$p_{inter\ 1\ absoluta} = 104\ 841\ \text{N/m}^2 - 101\ 300\ \text{N/m}^2$$

$$p_{inter\ relativa\ 1} = 3\ 541\ \text{N/m}^2$$

- Presencia de cavitación: para comprobar la presencia de la cavitación dentro del sistema, se debe comparar la presión intermedia relativa contra la presión de vapor relativa, ya que permite verificar la disminución de presión del sistema dando paso a que la presión de vapor aparezca, y por ende surja el fenómeno.

La presión de vapor relativa se obtiene a partir de la tabla del anexo 3, según la temperatura dentro del modelo.

$$P_{vapor\ absoluta} = 2\ 485\ \text{N/m}^2$$

$$P_{atmosférica} = 101\ 300\ \text{N/m}^2$$

$$P_{inter\ relativa\ 1} = 3\ 541\ \text{N/m}^2$$

Entonces:

$$P_{vapor\ relativa} = |P_{vapor\ absoluta} - P_{atmosférica}|$$

$$P_{vapor\ relativa} = |2\ 485\ \text{N/m}^2 - 101\ 300\ \text{N/m}^2|$$

$$P_{vapor\ relativa} = 98\ 815\ \text{N/m}^2$$

La siguiente condición debe cumplirse para poder indicar que la cavitación estuvo presente:

$$P_{vapor\ relativa} > P_{inter\ relativa}$$

Se procede entonces:

$$P_{vapor\ relativa} > P_{inter\ 1\ relativa}$$

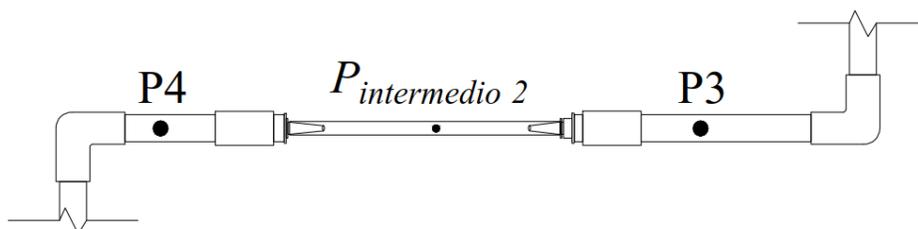
$$98\ 815\ N/m^2 > 3\ 541\ N/m^2$$

Sí se cumple la condición

3.5.1.4. Cálculos en constricción y dilatación simultánea (nivel 2)

Dentro de este nivel también se busca identificar la presencia de cavitación dentro del sistema, a través de la comparación de la presión intermedia 2 contra la presión de vapor. El esquema es el siguiente:

Figura 31. Esquema del modelo hidráulico, nivel 2



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2018.

El procedimiento es muy similar al del inciso anterior con la excepción de la variante de algunos datos, y por supuesto, la ecuación final a emplear. Entonces:

$$z_3 + \frac{p_3 \text{ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_3^2}{2g} = \left(z_{inter\ 2} + \frac{p_{inter\ 2\ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_{inter\ 2}^2}{2g} \right) + hf$$

$$z_3 + \frac{p_3 \text{ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_3^2}{2g} = \left(z_{inter\ 2} + \frac{p_{inter\ 2\ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_{inter\ 2}^2}{2g} \right) + k \frac{V_{inter\ 2}^2}{2g}$$

Teniendo en cuenta que:

$$z_3 \text{ y } z_{inter\ 2} = 0,00 \text{ m}$$

$$k = \text{valor de tabla XV} = x = 36,62$$

$$0,00 \text{ m} + \frac{p_3 \text{ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_3^2}{2g} = \left(0,00 \text{ m} + \frac{p_{inter\ 2\ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_{inter\ 2}^2}{2g} \right) + (x) \frac{V_{inter\ 2}^2}{2g}$$

$$(0 \text{ m}) + \frac{p_3 \text{ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_3^2}{2g} = \frac{p_{inter\ 2\ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_{inter\ 2}^2}{2g} + (36,62) \frac{V_{inter\ 2}^2}{2g}$$

La ecuación final es:

$$\frac{p_{inter\ 2\ absoluta}}{\gamma} = \frac{p_3 \text{ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_3^2}{2g} - \frac{V_{inter\ 2}^2}{2g} - 36,62 \frac{V_{inter\ 2}^2}{2g} \quad (\text{Ecuación 29})$$

Al obtener la ecuación anterior, se ejecuta la siguiente sustitución de valores:

$$\text{Nivel 2} = 0,5775 \text{ m}$$

$$\frac{p_3 \text{ absoluta}}{\gamma} = (1,2775 - 0,5775) \text{ m} + 10,337 \text{ m} = 11,04 \text{ m}$$

$$V_3 = V_{inter\ 2} = 0,0900\ m/s$$

Se emplea:

$$\frac{p_{inter\ 2\ absoluta}}{\gamma} = 11,04\ m + \frac{(0,0900\ m/s)^2}{2 * 9,81\ m/s^2} - \frac{(0,0900\ m/s)^2}{2 * 9,81\ m/s^2} - 36,62 \frac{(0,0900\ m/s)^2}{2 * 9,81\ m/s^2}$$

$$\frac{p_{inter\ 2\ absoluta}}{\gamma} = 11,02\ m$$

Seguido:

$$p_{inter\ 2\ absoluta} = 11,02\ m * \gamma$$

$$p_{inter\ 2\ absoluta} = 11,02\ m * 9\ 800\ N/m^3$$

$$p_{inter\ 2\ absoluta} = 108\ 012\ N/m^2$$

Y, se finaliza para obtener la presión relativa deseada:

$$p_{inter\ 2\ relativa} = 108\ 012\ N/m^2 - p_{atmosférica}$$

$$p_{inter\ 2\ relativa} = 108\ 012\ N/m^2 - 101\ 300\ N/m^2$$

$$p_{inter\ 2\ relativa} = 6\ 712\ N/m^2$$

Una vez calculada la presión intermedia 2, se procede a comprobar la condición establecida en el inciso anterior, en la cual se comprueba o no, el que la presión obtenida es menor a la presión de vapor dentro del sistema, que demuestra así que la cavitación estuvo presente en el sistema.

Entonces, se procede que:

$$P_{\text{vapor relativa}} > P_{\text{inter 2 relativa}}$$

$$98\,815 \text{ N/m}^2 > 6\,712 \text{ N/m}^2$$

Sí, se cumple la condición

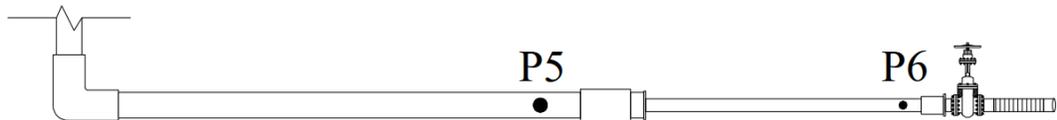
3.5.2. Cálculos hidráulicos en nivel 3

En este nivel no se pretende obtener un parámetro de cavitación solamente identificar el coeficiente de pérdidas menores en la constricción súbita.

3.5.2.1. Cálculos en constricción súbita

Para obtener teóricamente el coeficiente de pérdidas menores (k), se utiliza nuevamente, la ecuación de Bernoulli en conjunto con la igualación de la ecuación de pérdidas menores. El esquema es el siguiente:

Figura 32. Esquema del modelo hidráulico, nivel 3



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2018.

Por lo tanto, se comparan ambas ecuaciones para poder hacer el despeje, teniendo en cuenta que:

$$z_5 \text{ y } z_6 = 0,00 \text{ m}$$

Tabla XVI. Ecuaciones a igualar

Ecuación de Bernoulli	Ecuación de pérdidas menores
$Z_5 + \frac{P_5 \text{ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_5^2}{2g} = Z_6 + \frac{P_6 \text{ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_6^2}{2g} + hf$	$hf = k \frac{V^2}{2g}$
$\frac{P_5 \text{ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_5^2}{2g} = \frac{P_6 \text{ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_6^2}{2g} + hf$	<p>Según Robert L. Mott, para el caso de las pérdidas menores, la velocidad que se utiliza es la velocidad de la tubería menor, por lo tanto, la ecuación sería:</p>
$hf = \frac{P_5 \text{ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_5^2}{2g} - \frac{P_6 \text{ absoluta}}{\gamma} - \frac{V_6^2}{2g}$	
$hf = \left(\frac{P_5 \text{ absoluta}}{\gamma} - \frac{P_6 \text{ absoluta}}{\gamma} \right) + \left(\frac{V_5^2}{2g} - \frac{V_6^2}{2g} \right)$	
$hf = \left(\frac{P_5 \text{ absoluta}}{\gamma} - \frac{P_6 \text{ absoluta}}{\gamma} \right) - \left(\frac{V_6^2 - V_5^2}{2g} \right)$	$hf = k \frac{V_6^2}{2g}$

Fuente: elaboración propia.

Luego, se realiza la igualación de las ecuaciones anteriores, de la siguiente forma:

$$hf = hf$$

$$\left(\frac{P_5 \text{ absoluta}}{\gamma} - \frac{P_6 \text{ absoluta}}{\gamma} \right) - \left(\frac{V_6^2}{2g} - \frac{V_5^2}{2g} \right) = k \frac{V_6^2}{2g}$$

$$\left(\frac{2g}{V_6^2} \right) * \left[\left(\frac{P_5 \text{ absoluta}}{\gamma} - \frac{P_6 \text{ absoluta}}{\gamma} \right) - \left(\frac{V_6^2}{2g} - \frac{V_5^2}{2g} \right) \right] = k$$

$$k = \left[\left(\frac{P_5 \text{ absoluta}}{\gamma} - \frac{P_6 \text{ absoluta}}{\gamma} \right) - \left(\frac{V_6^2}{2g} - \frac{V_5^2}{2g} \right) \right] * \left[\frac{2g}{V_6^2} \right] \quad (\text{Ecuación 30})$$

Para la sustitución de valores los datos se obtienen de las tablas en la sección 3.5.1.1. y 3.5.1.2. Por lo que se procede:

$$\text{Nivel 3} = 0,460 \text{ m}$$

$$\frac{p_5 \text{ absoluta}}{\gamma} = (1,2250 - 0,460) + 10,337 = 11,16 \text{ m}$$

$$\frac{p_6 \text{ absoluta}}{\gamma} = (1,1975 - 0,460) + 10,337 = 11,13 \text{ m}$$

$$V_5 = 0,0900 \text{ m/s}$$

$$V_6 = 0,3600 \text{ m/s}$$

$$k = \left[\left(\frac{P_5 \text{ absoluta}}{\gamma} - \frac{P_6 \text{ absoluta}}{\gamma} \right) - \left(\frac{V_6^2}{2g} - \frac{V_5^2}{2g} \right) \right] * \left(\frac{2g}{V_6^2} \right)$$

$$k = \left[(11,16 - 11,13) \text{ m} - \left(\frac{(0,3600 \text{ m/s})^2}{2(9,81 \text{ m/s}^2)} - \frac{(0,0900 \text{ m/s})^2}{2(9,81 \text{ m/s}^2)} \right) \right] * \left(\frac{2(9,81 \text{ m/s}^2)}{(0,3600 \text{ m/s})^2} \right)$$

$$k = 3,2235$$

Este procedimiento se repite en cada corrida, con el fin de poder realizar un promedio y obtener el valor final del coeficiente k . Los valores finales estarán tabulados en el capítulo siguiente.

3.5.3. Cálculos hidráulicos posteriores en todo el sistema

Los cálculos hidráulicos posteriores en el sistema se realizan con el fin de observar y analizar el comportamiento del sistema según el tipo de flujo en cada nivel y sus respectivas pérdidas menores.

3.5.3.1. Comportamiento del flujo según número de Reynolds

El comportamiento de un flujo se define por la conducta de crecimiento de la capa límite del flujo, según Irving H. Shames en su libro *Mecánica de fluidos*. Por ende, bajo la misma referencia, se establecen tres tipos de conductas de flujo, los cuales se pueden evaluar a través del número de Reynolds, de la siguiente manera.

- Flujo laminar

Es el patrón en donde las capas de un fluido se deslizan una sobre otra, de forma ordenada y casi tranquila.

- Flujo de transición

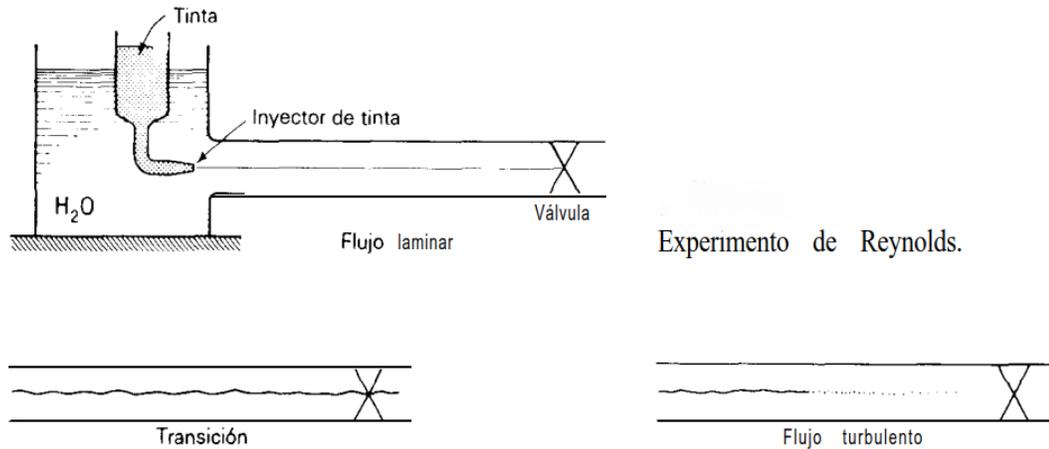
Es la transformación del movimiento ordenado de las capas del fluido a una condición en la cual se empiezan a desarrollar fluctuaciones irregulares dentro del flujo.

- Flujo turbulento

Ocurre cuando la conducta del flujo se vuelve irregular o desigual.

A través del experimento de Reynolds, expuesto en el estudio realizado por Irving H. Shames, se identifica de una mejor manera estos cambios, ya que se emplea una tinta especial para mejor visualización.

Figura 33. Tipos de flujos según Reynolds



Fuente: SHAMES, Irving H. *Mecánica de fluidos*. p. 316.

Existe una expresión matemática que permite obtener el número de Reynolds (el cual es adimensional), y un rango que clasifica el tipo de flujo según el valor obtenido, esto se apoya en el análisis expuesto en el libro de *Mecánica de fluidos* por Robert L. Mott. Siendo así, se prosigue con el cálculo:

Número de Reynolds:

$$R_e = \frac{VD}{\nu} \quad (\text{Ecuación 31})$$

Donde:

- $V = \text{velocidad del flujo } [m/s]$
- $D = \text{diámetro de tubería } [m]$
- $\nu = \text{viscosidad del fluido según temperatura } [m^2/s]$

Rango:

$$R_e < 2\,000 \rightarrow \text{Laminar}$$

$$2\,000 < R_e < 4\,000 \rightarrow \text{Transición}$$

$$R_e \geq 4\,000 \rightarrow \text{Turbulento}$$

Entonces, utilizando los datos de la primera corrida, se desarrolla la ecuación final:

$$V_{\text{Corrida } 1} = 0,0900 \text{ m/s}$$

$$D = 1" = 0,0254 \text{ m}$$

$$\text{Temperatura} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\nu = 9,85E^{-07} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$R_e = \frac{VD}{\nu}$$

$$R_e = \frac{(0,0900 \text{ m/s})(0,0254 \text{ m})}{(9,85E^{-07} \text{ m}^2/\text{s})}$$

$$R_e = 2\,284$$

Por lo tanto, según el rango, este valor corresponde a un flujo en transición. El procedimiento anterior se repite para cada corrida y nivel, los resultados finales estarán en el siguiente capítulo.

3.5.3.2. Factores de pérdidas menores o locales en obstáculos

Las pérdidas menores se originan por las válvulas, accesorios, cambios de sección transversal, entre otros. De acuerdo con Joseph B. Franzini, cuando la instalación de la tubería es corta, las pérdidas locales llegan a ser las pérdidas

principales, ya que estas llegan a ser mucho mayores que las pérdidas por fricción.

Por ende, con el objetivo de poder realizar una comparación entre los valores experimentales contra la teoría, se busca conocer el coeficiente k de estas pérdidas locales en cada obstáculo identificado. Empleando la ecuación:

$$hl = k \frac{V^2}{2g}$$

Se realiza el despeje para dicho coeficiente:

$$k = \frac{hl}{\frac{V^2}{2g}} \quad (\text{Ecuación 32})$$

Entonces, se dispone de los datos del primer nivel de la primera variación de sifón, y se usa la siguiente metodología:

- Hallar las pérdidas mediante la resta de lecturas entre los piezómetros.

$$h_l = (Lectura_{P_1} - Lectura_{P_2}) [m]$$

$$Lectura_{P_1} = 1,3950 \text{ m}$$

$$Lectura_{P_2} = 1,3825 \text{ m}$$

$$h_l = (Lectura_{P_1} - Lectura_{P_2})$$

$$h_l = (1,3950 - 1,3825) \text{ m}$$

$$h_l = 0,0125 \text{ m}$$

- De la sección 3.5.1.2, se usa el procedimiento y valor de la energía cinética calculado.

$$E.C = 0,000413 \text{ m}$$

- Empleando la ecuación No. 32, se determina el valor teórico de k en todas las corridas.

$$k = \frac{hl}{V^2 / \frac{2g}{2}}$$

Sustituyendo valores:

$$h_l = 0,0125 \text{ m}$$

$$E.C = 0,000413 \text{ m}$$

$$k = \frac{hl}{V^2 / \frac{2g}{2}}$$

$$k = 0,0125 \text{ m} / 0,000413 \text{ m}$$

$$k = 30,26$$

El procedimiento deberá aplicarse para cada nivel, y luego, se deberán promediar los valores para la obtención de un valor final.

3.5.3.3. Margen de error en magnitudes teóricas versus experimentales

Con el fin de conocer la dispersión, precisión y exactitud entre los valores experimentales y los valores teóricos obtenidos de los coeficientes de pérdidas menores, a lo largo del análisis, se emplea y define lo siguiente:

- k_{medido} = es el valor obtenido de la gráfica de comportamiento lineal
- k_{real} = es el valor obtenido mediante el despeje de la fórmula aplicada

Con las definiciones anteriores, se emplean entonces:

- Error absoluto: en valores experimentales contra valores teóricos dados por igualación de ecuaciones.

El error absoluto, según Adriana Guerrero en su trabajo acerca de la *Introducción de errores en la medición*, se emplea con el fin de conocer la desviación absoluta entre los datos experimentales y teóricos del nivel 3, en donde se aloja la constricción súbita, por cada variación de altura. La ecuación es la siguiente:

$$Error\ absoluto = k_{medido} - k_{real} \quad (\text{Ecuación 33})$$

Se procede a emplear la sustitución de valores para la primera variación de sifón:

$$\begin{aligned} Error\ absoluto &= k_{medido} - k_{real} \\ Error\ absoluto &= 0,9758 - 0,919 \\ Error\ absoluto &= 0,06 \end{aligned}$$

Los valores finales de por cada variación serán tabulados en el capítulo siguiente.

- Error relativo: en valores experimentales contra los valores teóricos dados por el despeje de la fórmula de pérdidas menores.

El error relativo por su parte, y con base en el contenido analizado por Adriana Guerrero, permite resaltar la importancia relativa de la desviación en la medición, con respecto al valor real, de forma porcentual, para mejor visualización.

$$Error\ absoluto = \frac{k_{medido} - k_{real}}{k_{real}} * 100 \% \quad (Ecuación\ 34)$$

Entonces, se sustituyen los valores para el primer retorno en U del sifón I:

$$\begin{aligned} Error\ absoluto &= \frac{k_{medido} - k_{real}}{k_{real}} \\ &= \frac{5,541 - 11,65}{11,65} * 100 \% \end{aligned}$$

$$Error\ absoluto = 52 \%$$

Los valores finales de por cada variación serán tabulados en el capítulo siguiente.

4. RESULTADOS

A continuación, se presenta un análisis que corresponde a la investigación y experimentación realizada, en donde se exponen los resultados finales de los cálculos elaborados en el capítulo anterior de forma tabulada, y se muestran los gráficos finales comparativos de los valores obtenidos en cada variación de altura de sifón.

4.1. Análisis del comportamiento observado en el modelo hidráulico

Como parte de la metodología dentro de la experimentación se diseñó y desarrolló un modelo hidráulico que abarcara los tres obstáculos identificados. Los materiales que componían al sistema hidráulico fueron materiales de venta comercial, por fines económicos y de estudio. Al ensamblar dichos componentes se emplearon distintas tácticas para que dicho modelo funcionara de una manera óptima, desde el nivel 1 al 3, sin tener mayores fugas, y que resistiera el máximo de presión implementada.

El diseño de la dirección del flujo se emplea de izquierda a derecha. Inicia desde el banco hidráulico, el cual se conecta a la parte superior del sistema; pasando por la curvatura en U; luego, llega al cambio simultáneo de diámetro; seguido de una contracción súbita en los conductos, la cual conecta a una válvula de compuerta; y finaliza, con una manguera que regresa el líquido al banco hidráulico. Esta configuración se ejecuta con el objetivo de que dicho flujo circule por gravedad de forma descendente, para un buen manejo del sistema y un orden adecuado para la obtención de pérdidas en los piezómetros.

Durante la manipulación de las corridas, estuvieron presentes varios factores: la intervención humana para elaborar y ajustar el modelo, el manejo del equipo para efectuar las mediciones, la temperatura del agua, la presión y la velocidad implementadas por el banco hidráulico, y la variación del flujo mediante la válvula. Mientras se realizan las pruebas correspondientes, se observa la presencia de pequeñas cavidades visibles en la curvatura en U y en el cambio de diámetro; además, del sonido ocasionados por las vibraciones al pasar el flujo por los conductos y accesorios, a partir del sifón.

En el tramo final, cerca de la contracción súbita se contempla en los piezómetros, entre el diámetro mayor y el menor, un descenso grande entre la magnitud de metro columna de agua. Asimismo, al pasar la válvula de compuerta, entre la conexión del adaptador y la manguera final, se visualizan pequeñas cavidades y la forma turbulenta del fluido, lo cual se infiere que se basa en todo el comportamiento hidráulico (velocidad, presión del agua, presión de vapor, viscosidad del agua, pérdidas menores, entre otras) acumulado durante el análisis de datos efectuados.

4.2. Tablas finales

En el capítulo anterior se expuso a detalle el procedimiento de los cálculos hidráulicos abarcados para poder analizar el sistema de conductos a presión, por ende, en este inciso se presentan los datos finales tabulados

4.2.1. Obtención de la presión intermedia 1

Como se expuso en el inciso 3.5.1.3 del capítulo anterior, la presión intermedia 1 surge en la parte del retorno en U, dentro del modelo, y su valor se obtiene al aplicar la ecuación No. 28, generada mediante el análisis de la

ecuación de Bernoulli; el objetivo de esta es conocer el comportamiento de la presión en este punto durante las cinco corridas realizadas en la experimentación.

Tabla XVII. **Presión intermedia 1, sifón I**

Sifón:	I	Análisis:	Retorno en U			
x:	5,5405	Z _{inter.} :	0,275 m	Nivel 1:	0,758 m	
Corrida	P ₁ relativa/ γ (m)	P ₁ absoluta/ γ (m)	V ₁ (m/s)	V _{inter 1} (m/s)	P _{inter 1} absoluta/ γ (m)	P _{inter 1} absoluta (N/m ²)
1	0,6375	10,97	0,0900	0,0900	10,70	104 841
2	0,6075	10,94	0,1856	0,1856	10,66	104 511
3	0,5925	10,93	0,2881	0,2881	10,64	104 297
4	0,4275	10,76	0,4489	0,4489	10,46	102 516
5	0,4175	10,75	0,5612	0,5612	10,43	102 261

Corrida	P _{vapor} relativa (N/m ²)	P _{inter 1} relativa (N/m ²)	P _{vapor} > P _{inter 1}
1	98 815	3 541	Correcto
2	98 815	3 211	Correcto
3	98 815	2 997	Correcto
4	98 815	1 216	Correcto
5	98 815	961	Correcto

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Presión intermedia 1, sifón II**

Sifón:	II	Análisis:	Retorno en U			
x:	4,203	Z _{inter.} :	0,3646 m	Nivel 1:	0,758 m	
Corrida	P ₁ relativa/ γ (m)	P ₁ absoluta/ γ (m)	V ₁ (m/s)	V _{inter 1} (m/s)	P _{inter 1} absoluta/ γ (m)	P _{inter 1} absoluta (N/m ²)
1	0,6825	11,02	0,1300	0,1300	10,65	104 398
2	0,6125	10,95	0,3188	0,3188	10,57	103 623
3	0,4475	10,78	0,4000	0,4000	10,40	101 944
4	0,4225	10,76	0,5341	0,5341	10,36	101 568
5	0,3900	10,73	0,5879	0,5879	10,33	101 186

Continuación de la tabla XVIII.

Corrida	P_{vapor} (N/m^2)	$P_{\text{inter 1}}$ relativa (N/m^2)	$P_{\text{vapor}} > P_{\text{inter 1}}$
1	98 815	3 098	Correcto
2	98 815	2 323	Correcto
3	98 815	644	Correcto
4	98 815	268	Correcto
5	98 815	-114	Correcto

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Presión intermedia 1, sifón III**

Sifón:	III	Análisis:	Retorno en U			
x:	8,5843	Z_{inter} :	0,4600 m	Nivel 1:	0,758 m	
Corrida	P_1 relativa/ γ (m)	P_1 absoluta/ γ (m)	V_1 (m/s)	$V_{\text{inter 1}}$ (m/s)	$P_{\text{inter 1}}$ absoluta/ γ (m)	$P_{\text{inter 1}}$ absoluta (N/m^2)
1	0,5875	10,92	0,1155	0,1155	10,46	102 521
2	0,5175	10,85	0,2083	0,2083	10,38	101 770
3	0,3700	10,71	0,3509	0,3509	10,22	100 154
4	0,2950	10,63	0,4493	0,4493	10,13	99 250
5	0,2550	10,59	0,5292	0,5292	10,07	98 690

Corrida	P_{vapor} (N/m^2)	$P_{\text{inter 1}}$ relativa (N/m^2)	$P_{\text{vapor}} > P_{\text{inter 1}}$
1	98 815	1 221	Correcto
2	98 815	470	Correcto
3	98 815	-1 146	Correcto
4	98 815	-2 050	Correcto
5	98 815	-2 610	Correcto

Fuente: elaboración propia.

4.2.2. Obtención de la presión intermedia 2

A partir del inciso 3.5.1.4 (capítulo anterior), dentro del nivel 2 se integra una constricción y dilatación simultánea, sobre la cual se procede a obtener la presión intermedia 2. Esto se debe a que se requiere conocer su valor para estudiar el comportamiento de dicha presión, en este obstáculo.

Tabla XX. **Presión intermedia 2, sifón I**

Sifón:	I	Análisis:	Constricción y dilatación simultánea			
x:	36,62	Z _{inter} :	0,275 m	Nivel 2:	0,578 m	
Corrida	P ₃ relativa/ γ (m)	P ₃ absoluta/ γ (m)	V ₃ (m/s)	V _{inter 2} (m/s)	P _{inter 2} absoluta/ γ (m)	P _{inter 2} absoluta (N/m ²)
1	0,7000	11,04	0,0900	0,0900	11,02	108 012
2	0,7400	11,08	0,1856	0,1856	11,01	107 922
3	0,7075	11,04	0,2881	0,2881	10,89	106 715
4	0,5400	10,88	0,4489	0,4489	10,50	102 904
5	0,4150	10,75	0,5612	0,5612	10,16	99 605

Corrida	P _{vapor} relativa (N/m ²)	P _{inter 2} relativa (N/m ²)	P _{vapor} > P _{inter 2}
1	98 815	6 712	Correcto
2	98 815	6 622	Correcto
3	98 815	5 415	Correcto
4	98 815	1 604	Correcto
5	98 815	-1 695	Correcto

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Presión intermedia 2, sifón II**

Sifón:	II	Análisis:	Constricción y dilatación simultánea			
x:	35,774	Z _{inter} :	0,3646 m	Nivel 2:	0,578 m	
Corrida	P ₃ relativa/ γ (m)	P ₃ absoluta/ γ (m)	V ₃ (m/s)	V _{inter 2} (m/s)	P _{inter 2} absoluta/ γ (m)	P _{inter 2} absoluta (N/m ²)
1	0,8250	11,16	0,1300	0,1300	11,13	109 083
2	0,7475	11,08	0,3188	0,3188	10,90	106 809

Continuación de la tabla XXI.

Corrida	P_3 relativa/ γ (m)	P_3 absoluta/ γ (m)	v_3 (m/s)	$V_{inter\ 2}$ (m/s)	$P_{inter\ 2}$ absoluta/ γ (m)	$P_{inter\ 2}$ absoluta (N/m ²)
3	0,5725	10,91	0,4000	0,4000	10,62	104 051
4	0,4775	10,81	0,5341	0,5341	10,29	100 881
5	0,4600	10,80	0,5879	0,5879	10,17	99 630

Corrida	P_{vapor} relativa (N/m ²)	$P_{inter\ 2}$ relativa (N/m ²)	$P_{vapor} > P_{inter\ 2}$
1	98 815	7 783	Correcto
2	98 815	5 509	Correcto
3	98 815	2 751	Correcto
4	98 815	-419	Correcto
5	98 815	-1 670	Correcto

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. Presión intermedia 2, sifón III

Sifón:	III	Análisis:	Constricción y dilatación simultánea			
x:	42,101	Z_{inter} :	0,46 m	Nivel 2:	0,578 m	
Corrida	P_3 relativa/ γ (m)	P_3 absoluta/ γ (m)	v_3 (m/s)	$V_{inter\ 2}$ (m/s)	$P_{inter\ 2}$ absoluta/ γ (m)	$P_{inter\ 2}$ absoluta (N/m ²)
1	0,7075	11,04	0,1155	0,1155	11,02	107 953
2	0,5425	10,88	0,2083	0,2083	10,79	105 704
3	0,4675	10,80	0,3509	0,3509	10,54	103 291
4	0,3775	10,71	0,4493	0,4493	10,28	100 753
5	0,2850	10,62	0,5292	0,5292	10,02	98 202

Corrida	P_{vapor} relativa (N/m ²)	$P_{inter\ 2}$ relativa (N/m ²)	$P_{vapor} > P_{inter\ 2}$
1	98 815	6 653	Correcto
2	98 815	4 404	Correcto
3	98 815	1 991	Correcto
4	98 815	-547	Correcto
5	98 815	-3 098	Correcto

Fuente: elaboración propia.

4.2.3. Coeficiente de pérdidas (k) por igualación de ecuación

En relación con el inciso 3.5.2.1 (capítulo anterior), se lleva a cabo el cálculo para obtener el valor del coeficiente k , al implementar la igualación entre la ecuación de Bernoulli y la ecuación de pérdidas menores; esto con el fin de examinar la conducta hidráulica de dichas pérdidas en este obstáculo.

Tabla XXIII. **Constricción súbita, sifón I**

Sifón:	I	Análisis:	Constricción súbita				
x:	0,9758	zinter:	0,275 m	Nivel 3:	0,405 m		
Corrida	P5 relativa/ γ (m)	P6 relativa/ γ (m)	P5 absoluta/ γ (m)	P6 absoluta/ γ (m)	V5 (m/s)	V6 (m/s)	k1
1	0,8200	0,7925	11,16	11,13	0,0900	0,3600	3,2235
2	0,7475	0,6900	11,08	11,03	0,1856	0,7423	1,1090
3	0,5900	0,5125	10,93	10,85	0,2881	1,1522	0,2074
4	0,1125	-0,0500	10,45	10,29	0,4489	1,7957	0,0509
5	-0,0600	-0,3025	10,28	10,03	0,5612	2,2447	0,0065
k_{total}							0,919

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Constricción súbita, sifón II**

Sifón:	II	Análisis:	Constricción súbita				
x:	1,0787	zinter:	0,3646 m	Nivel 3:	0,405 m		
Corrida	P5 relativa/ γ (m)	P6 relativa/ γ (m)	P5 absoluta/ γ (m)	P6 absoluta/ γ (m)	V5 (m/s)	V6 (m/s)	k2
1	0,8700	0,8400	11,21	11,18	0,1300	0,5201	1,2381
2	0,5500	0,4525	10,89	10,79	0,3188	1,2751	0,2387
3	0,2975	0,1275	10,63	10,46	0,4000	1,5999	0,3650
4	0,0650	-0,1800	10,40	10,16	0,5341	2,1363	0,1154
5	0,0275	-0,2650	10,36	10,07	0,5879	2,3517	0,0998
k_{total}							0,411

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Constricción súbita, sifón III**

Sifón:	III	Análisis:	Constricción súbita				
x:	1,0196	zinter:	0,46 m	Nivel 3:	0,405 m		
Corrida	P5 relativa/ γ (m)	P6 relativa/ γ (m)	P5 absoluta/ γ (m)	P6 absoluta/ γ (m)	V5 (m/s)	V6 (m/s)	k3
1	0,7825	0,7575	11,12	11,09	0,1155	0,4619	1,3602
2	0,4800	0,4125	10,82	10,75	0,2083	0,8331	0,9699
3	0,1925	0,0750	10,53	10,41	0,3509	1,4037	0,2320
4	-0,1050	-0,2775	10,23	10,06	0,4493	1,7972	0,1100
5	-0,1225	-0,3400	10,21	10,00	0,5292	2,1168	0,0145
						k_{total}	0,537

Fuente: elaboración propia.

4.2.4. Comportamiento de flujo según Reynolds

De conformidad con el inciso 3.5.3.1 (capítulo anterior), se obtiene el valor del número de Reynolds para conocer el tipo de flujo (laminar, de transición o turbulento) que se tiene en el sistema, y con ello, examinar el comportamiento hidráulico del fluido durante la experimentación.

Tabla XXVI. **Tipo de flujo, sifón I**

Sifón I	Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3	
Corrida	Re ₁	Flujo	Re ₂	Flujo	Re ₃	Flujo
1	2 284	Transición	2 284	Transición	4 386	Turbulento
2	4 710	Turbulento	4 710	Turbulento	9 044	Turbulento
3	7 311	Turbulento	7 311	Turbulento	14 037	Turbulento
4	11 394	Turbulento	11 394	Turbulento	21 877	Turbulento
5	14 243	Turbulento	14 243	Turbulento	27 346	Turbulento

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. Tipo de flujo, sifón II

Sifón II	Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3	
Corrida	Re1	Flujo	Re2	Flujo	Re3	Flujo
1	3 300	Transición	3 300	Transición	6 336	Turbulento
2	8 090	Turbulento	8 090	Turbulento	15 534	Turbulento
3	10 152	Turbulento	10 152	Turbulento	19 492	Turbulento
4	13 555	Turbulento	13 555	Turbulento	26 026	Turbulento
5	14 922	Turbulento	14 922	Turbulento	28 650	Turbulento

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. Tipo de flujo, sifón III

Sifón III	Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3	
Corrida	Re1	Flujo	Re2	Tipo de Flujo	Re3	Flujo
1	2 931	Transición	2 931	Transición	5 628	Turbulento
2	5 286	Turbulento	5 286	Turbulento	10 150	Turbulento
3	8 907	Turbulento	8 907	Turbulento	17 101	Turbulento
4	11 404	Turbulento	11 404	Turbulento	21 895	Turbulento
5	13 432	Turbulento	13 432	Turbulento	25 789	Turbulento

Fuente: elaboración propia.

4.2.5. Factor de pérdidas menores (k) por despeje

El factor de pérdidas menores k , se obtiene a través del procedimiento establecido en el inciso 3.5.3.2 (capítulo anterior), con el fin de poder comparar y analizar los valores en este inciso, contra los valores finales del inciso 4.2.3. La metodología empleada consiste en el despeje matemático de la ecuación general de pérdidas menores, la cual, a diferencia de la ecuación No. 30, es una expresión matemática con menor cantidad de variables.

Tabla XXIX. Factor k en sifón I

Sifón I	Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3	
Corrida	h_L (m)	k_1	h_L (m)	k_2	h_L (m)	k_3
1	0,0125	30,26	0,0350	84,73	0,0275	4,16
2	0,0200	11,39	0,1200	68,33	0,0575	2,05
3	0,0250	5,91	0,1925	45,50	0,0775	1,14
4	0,0525	5,11	0,3825	37,22	0,1625	0,99
5	0,0900	5,61	0,5675	35,34	0,2425	0,94
	k_{total1}	11,65	k_{total2}	54,23	k_{total3}	1,86

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. Factor k en sifón II

Sifón II	Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3	
Corrida	h_L (m)	k_1	h_L (m)	k_2	h_L (m)	k_3
1	0,0075	8,70	0,0650	75,42	0,0300	2,18
2	0,0200	3,86	0,2850	55,01	0,0975	1,18
3	0,0350	4,29	0,3475	42,60	0,1700	1,30
4	0,0600	4,13	0,4975	34,21	0,2450	1,05
5	0,0750	4,26	0,5925	33,62	0,2925	1,04
	k_{total1}	5,05	k_{total2}	48,17	k_{total3}	1,35

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. Factor k en sifón III

Sifón III	Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3	
Corrida	h_L (m)	k_1	h_L (m)	k_2	h_L (m)	k_3
1	0,0175	25,73	0,0575	84,56	0,0250	2,30
2	0,0400	18,08	0,1525	68,95	0,0675	1,91
3	0,0525	8,36	0,2975	47,38	0,1175	1,17
4	0,0875	8,50	0,4625	44,93	0,1725	1,05
5	0,1200	8,40	0,5550	38,87	0,2175	0,95
	k_{total1}	13,82	k_{total2}	56,94	k_{total3}	1,47

Fuente: elaboración propia.

4.2.6. Errores analizados

Como se ha mencionado en el inciso 3.5.3.3 (capítulo anterior), es de suma importancia el conocer los errores absolutos y relativos de los valores calculados, ya que, con ellos, es posible interpretar y complementar el análisis de comportamiento hidráulico del fluido dentro del modelo a escala, en la experimentación realizada. Los resultados finales son:

Tabla XXXII. **Error absoluto entre valor teórico frente a valor experimental**

Error absoluto	Constricción súbita (k_3)
Sifón I	0,06
Sifón II	0,67
Sifón III	0,48

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII . **Error relativo entre valor teórico frente a valor experimental**

Error relativo	k_1	k_2	k_3
Sifón I	52 %	32 %	47 %
Sifón II	17 %	26 %	20 %
Sifón III	38 %	26 %	31 %

Fuente: elaboración propia.

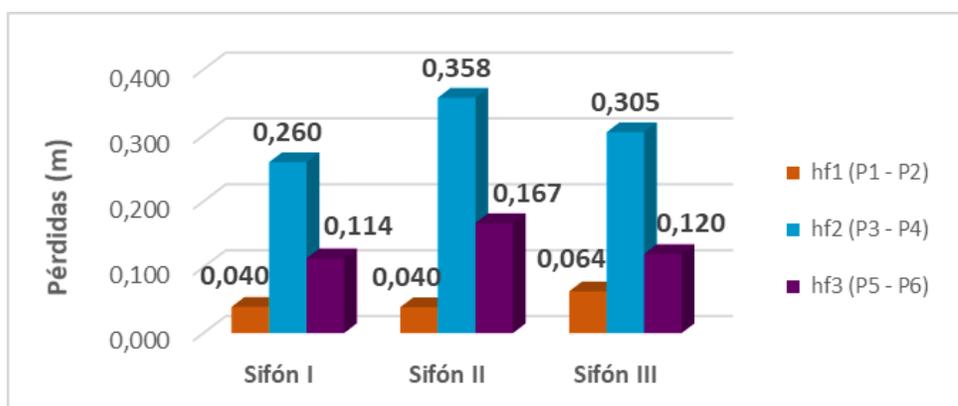
4.3. Análisis de resultados experimentales a través del software Excel 2016

De acuerdo con la estrategia de trabajo adoptada, se genera una hoja electrónica de Excel para facilitar los cálculos hidráulicos con los datos generados en la experimentación; con el soporte de esta hoja, se generan gráficos finales que presentan los promedios de los valores obtenidos en las tablas finales, con el fin de concebir de mejor forma los alcances de estos datos en cada variación de sifón.

4.3.1. Promedio de pérdidas en cada nivel

Como primer punto, se determinan las pérdidas y la energía cinética de cada nivel; los valores calculados se promedian para cada variación de sifón, y se representan en la figura 34; de esta se deduce que dichas pérdidas tienden a ser mayores en el nivel dos (hf_2), debido a las velocidades actuantes antes y durante ese punto de estudio.

Figura 34. Gráfico de promedio de pérdidas por sifón (c/nivel)



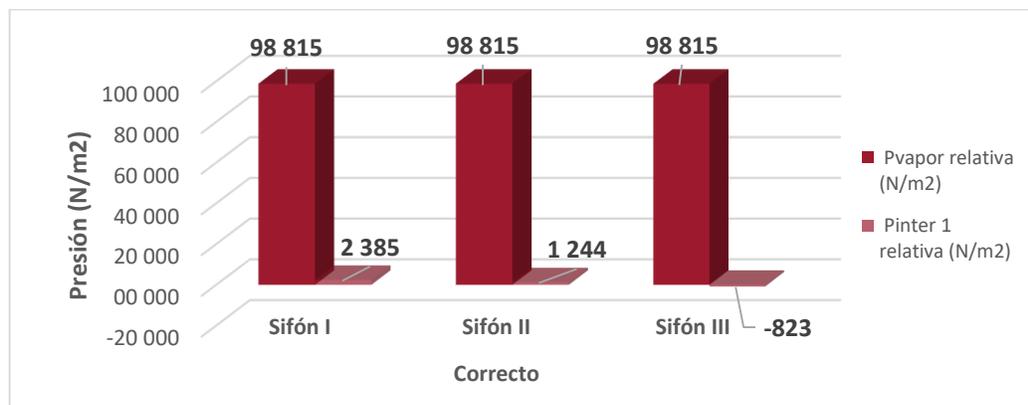
Fuente: elaboración propia.

4.3.2. Presión intermedia 1 y 2, por variación de sifón

Como segundo punto, debido a que se requiere encontrar un parámetro que muestre si el fenómeno de cavitación estuvo presente dentro del sistema, en especial en la curvatura en U (sifón) y en la constricción-dilatación simultánea, se busca determinar las presiones (presión intermedia 1 y 2) existentes en el punto medio de estos dos segmentos; a través de la ecuación de Bernoulli en conjunto con la sustitución del valor del coeficiente k dado por las pendientes de las gráficas de comportamiento lineal, se logra determinar $P_{inter\ 1}$ y $P_{inter\ 2}$.

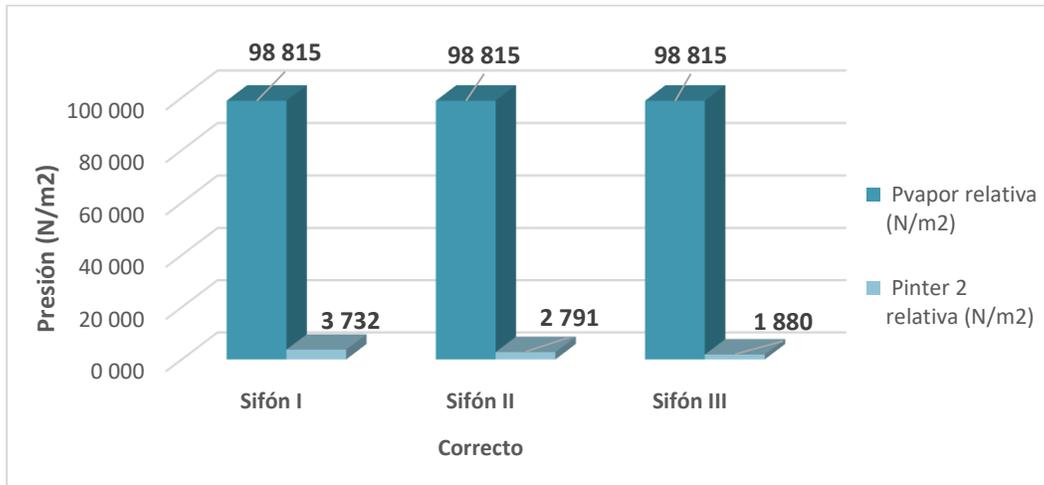
Al obtener los valores de las presiones intermedias, estos se promedian y se grafican en las figuras 35 y 36. A través de dichas gráficas, se visualiza que estas son menores que la presión de vapor, lo que comprueba la presencia del fenómeno de cavitación dentro del sistema. Por otro lado, se escudriña que dichos valores de las presiones intermedias disminuían conforme las corridas; por lo cual, se deduce que, a mayor caudal en estos, mayor será la presencia del fenómeno en el sistema hidráulico debido al aumento de la presión de vapor.

Figura 35. Gráfico de promedio de Pinter 1 frente a Pv



Fuente: elaboración propia.

Figura 36. Gráfico de promedio de Pinter 2 frente a Pv



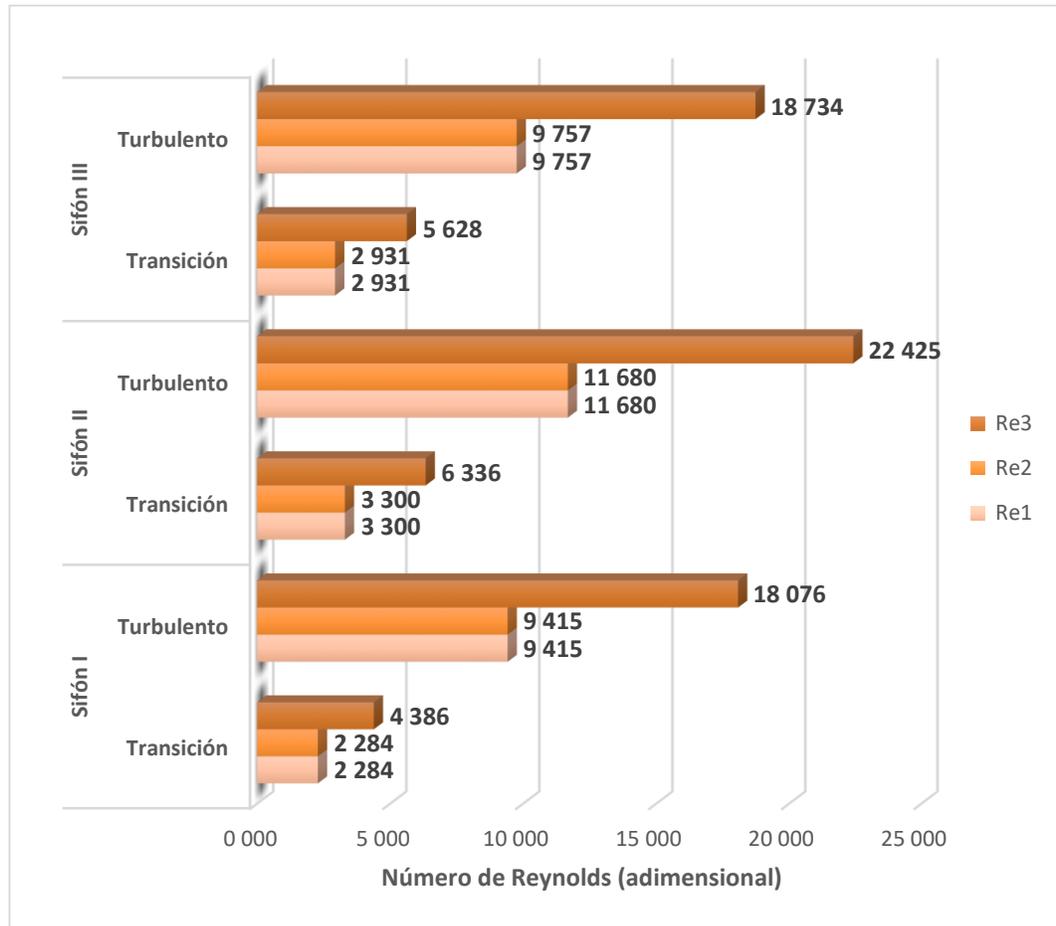
Fuente: elaboración propia.

4.3.3. Tipo de flujo según Reynolds por variación de sifón

Como tercer punto, se obtiene el número de Reynolds, el cual, en la siguiente gráfica, corresponde a cada análisis del tipo de flujo por nivel calculado anteriormente. Cada nivel se identifica por el código de color asignado, siendo así su nomenclatura:

- Re_1 = número de Reynolds promedio, en nivel 1
- Re_2 = número de Reynolds promedio, en nivel 2
- Re_3 = número de Reynolds promedio, en nivel 3

Figura 37. Gráfico de comportamiento de flujo por niveles



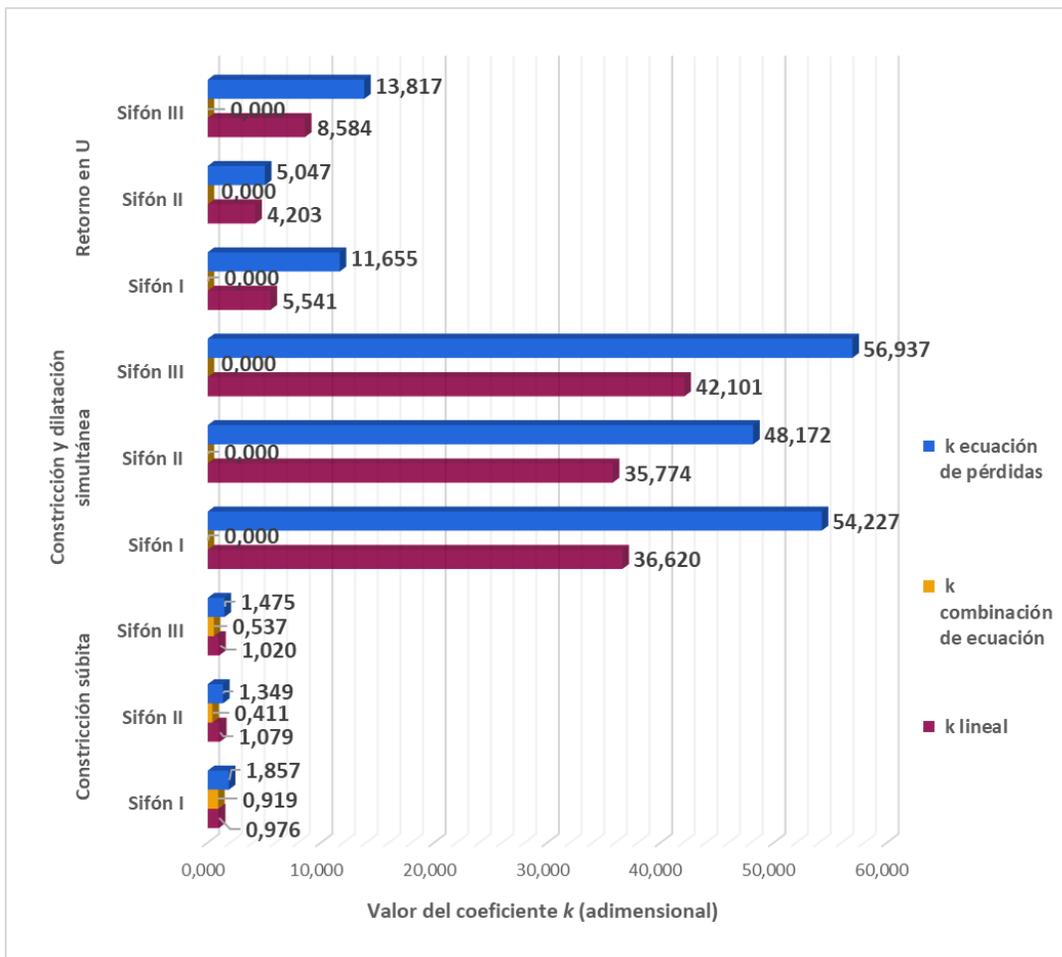
Fuente: elaboración propia.

Se analiza que, conforme al aumento de pérdidas, caudales y velocidades, el tipo de flujo dentro del sistema se modifica con el paso; y, a través, del número de Reynolds obtenido en cada nivel, se observa en la figura 37, la tipificación del flujo, la cual resulta ser en su mayoría de transición y turbulento. Por ello, se infiere que este comportamiento justifica la manifestación de los sonidos y vibraciones en el modelo presenciados durante el estudio.

4.3.4. Valores del coeficiente k obtenidos

En continuación con la metodología adoptada para analizar el comportamiento hidráulico en el modelo a escala, se presentan los tres valores promediados del coeficiente de pérdidas menores k , que se obtuvieron mediante las gráficas de comportamiento lineal (valor experimental) contra el valor de k por la igualación de ecuaciones y por despeje (ambos representan valores teóricos).

Figura 38. Gráfico comparativo de valores del coeficiente k



Fuente: elaboración propia.

Observando la figura 38, en el segmento de constricción súbita, y la tabla XXXII, que muestra la dispersión de error entre los datos teóricos contra los experimentales, se señala que estos difieren bastante, en especial en la variación II y III del sifón. Se argumenta que la variación de estos pudo ser influenciada por los errores sistemáticos y accidentales que se dieron al momento de las corridas; por ende, se determina que los valores experimentales son precisos, pero no exactos con respecto a los valores teóricos.

Por último, se deduce el coeficiente promedio de pérdidas menores “ k ” a través de la ecuación convencional de este; el valor se obtiene por cada nivel, y se compara con los valores obtenidos por las gráficas de comportamiento lineal. Mediante la figura 38 y tabla XXXIII, se visualizan los valores obtenidos y el error absoluto entre estos debido a su dispersión en magnitudes, a lo que se alude la observación que, entre niveles, en especial en el sifón II y III, los valores experimentales tuvieron una mayor precisión y mejor exactitud con respecto a los valores teóricos calculados.

Sin embargo, para el caso del sifón I la dispersión entre estos valores fue mayor y su precisión no fue tan buena, por lo que se infiere, nuevamente, que estos pudieron ser influenciados por errores de calibración o factores incontrolables que se dieron al momento de la obtención de datos. Por otro parte, se resalta que los valores del coeficiente k , permiten validar la conducta del incremento en las pérdidas conforme aumenta el caudal, y realza el que las pérdidas menores influyen más dentro de un modelo a escala que las pérdidas por fricción.

CONCLUSIONES

1. En el modelo a escala se identifican tres obstáculos prominentes por cada nivel que inicia en el retorno o curvatura en U, seguido de la constricción y dilatación simultáneas, y finaliza con la constricción súbita. Estas tres condiciones se reconocen como impedimentos para una fluidez óptima del líquido dentro del sistema, ya que, las pérdidas que se generan dentro del sistema son notablemente altas, y su crecimiento es significativo a medida que se aumenta la velocidad en el flujo.
2. Los coeficientes de pérdidas menores determinados en cada nivel por cada variación de altura de sifón, permiten identificar que afectan en gran medida a las presiones evaluadas y calculadas en los puntos intermedios; ya que, por su comportamiento lineal de aumento, influyen en la disminución de las presiones en el sistema en dichos puntos, que da lugar al incremento de la presión de vapor dentro del mismo, y como consecuencia, promueve la concepción de innumerables burbujas de aire, a lo largo de los conductos a presión y en la manguera de salida del fluido en estudio.
3. A través del software de Microsoft Excel 2016, se facilitan los cálculos elaborados, ya que, la cantidad de datos generados durante la experimentación, eran abundantes. Gracias a la implementación de esta metodología fue posible presentar y demostrar la presencia del fenómeno de cavitación dentro de un sistema de conductos a presión, y el comportamiento hidráulico que este tiene ante dicho fenómeno.

RECOMENDACIONES

1. Para un mejor análisis en los obstáculos dentro del sistema, el modelo podría agrandarse a manera que existan mayores tramos que abarque el líquido, y, por ende, se produzca con más claridad y prolongación el fenómeno cavitativo. Además, se podrían reducir las variaciones de altura de los sifones e implementar algún otro obstáculo que se considere para el estudio.
2. Para una mejor calidad de los valores experimentales obtenidos con respecto de los datos teóricos, se debe establecer previamente el nivel al cual deben iniciarse las mediciones en el tablero de piezómetros al momento de las corridas, ya que se considera que estos influyen en gran medida en el análisis hidráulico.
3. Utilizar el coeficiente de pérdidas (k) según el material de tuberías de las fuentes establecidas para una variante en el análisis de los parámetros de presiones para verificar la presencia del fenómeno de cavitación, y evaluar la veracidad de los datos arrojados experimentalmente contra los datos teóricos.
4. Utilizar siempre el software de Microsoft Excel o cualquier otro para facilidad de análisis de los datos que se requieran y datar los resultados mediante gráficos y tablas.

BIBLIOGRAFÍA

1. BRENNEN, Christopher E. *Cavitation and bubble dynamics*. Pasadena, California: California Institute of Technology, 1995. 291 p.
2. CZEKAJ, Daniel. *Aplicaciones de la ingeniería: maquinaria hidráulica en embarcaciones pesqueras pequeñas*. Food & Agriculture Org. 1988. [en línea]. <https://books.google.com.gt/books?id=Dxs7kl5_okYC&pg=PA90&dq=hidrodin%C3%A1mica+en+hidr%C3%A1ulica&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwilqavM6r3mAhUBzIkKHX4vBXgQ6AEIVDAG#v=onepage&q=hidrodin%C3%A1mica%20en%20hidr%C3%A1ulica&f=false>. [Consulta: 18 de diciembre de 2019].
3. EISENBERG, Phillip. *Cavitation*. United States of America: Hydronautics Incorporated. 1968. 128 p.
4. FRANZINI, Joseph B; FINNEMORE, E. John. *Mecánica de fluidos con aplicaciones en ingeniería*. 9a ed. Madrid, España: McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U., 1999. 500 p.
5. GÓMEZ, Ximena A. et al. *Informe mecánico de fluidos: propiedades de los fluidos*. Bogotá, Colombia: Facultad de Ingeniería, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 2017. 35 p.
6. GUERRERO PEÑA, Adriana; DÍAZ LONDOÑO, Gloria María. *Introducción de errores en la medición* [en línea].

<<https://books.google.com.gt/books?id=17JJ-C-crcYC&printsec=frontcover&dq=error+absoluto+y+relativo&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwi96uSwuNzoAhXFmq0KHa12AcIQ6AEIRjAE#v=onepage&q=error%20absoluto%20y%20relativo&f=false>>
. [Consulta: 07 marzo de 2020].

7. GUEVARA CASTILLO, Francisco Javier; et al. *Potencia fluida*. México: Pearson, 2015. 298 p.
8. MARCHEGIANI, Ariel R. *Cavitación*. Trabajo de Laboratorio de Máquinas Hidráulicas. Universidad Nacional del Comahue, Facultad de Ingeniería, Argentina, 2006. 26 p.
9. MATAIX, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. 2a ed. Madrid, España: Ediciones del Castillo, S.A., 1986. 660 p.
10. MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. 6a ed. México: Pearson Educación, 2006. 626 p.
11. P. NOVAK. et al. *Hydraulic structures*. 4a ed. USA and Canada: Taylor & Francis, 2007. 700 p.
12. PALMA MAYA, César. *La cavitación: el fenómeno y su presencia en vertederos y conductos a presión*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2001. 140 p.
13. RENDÓN VARGAS, Arquímedes Rafael. *Origen de la cavitación y sus efectos en estructuras hidráulicas*. Trabajo de graduación de Ing.

Civil. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2008. 85 p.

14. RENNELS, Donald C. y HUDSON, Hobart M. *Pipe flow: a practical and comprehensive guide*. United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2012. 279 p.
15. SALDARRIAGA, Juan. *Hidráulica de tuberías: abastecimiento de agua, redes y riegos*. Colombia: Alfaomega, 2007. 671 p.
16. SHAH, Yatish T. *Cavitation reaction engineering* [en línea]. <<https://books.google.com.gt/books?id=uJbTBwAAQBAJ&pg=PA6&lpg=PA6&dq=Tullis+y+Govindarajan&source=bl&ots=3e-V0KDMdM&sig=ACfU3U0JLzyTB6-Yn1iCsbYzReZdLP1mhQ&hl=es&sa=X#v=onepage&q=Tullis%20y%20Govindarajan&f=false>>. [Consulta: 07 de marzo de 2019].
17. SHAMES, Irving H. *Mecánica de fluidos*. 3a ed. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana, S.A., 1995. 825 p.
18. SZALA, Mirsolaw. *Application of computer image analysis software for determining incubation period of cavitation erosion-preliminary results*. [en línea]. <https://www.researchgate.net/publication/321860428_Application_of_computer_image_analysis_software_for_determining_incubation_period_of_cavitation_erosion_-_preliminary_results>. [Consulta: 17 de septiembre de 2018].

19. TÚCHEZ MEJÍA, Jorge. *Estudio y experimento del fenómeno de cavitación*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2010. 105 p.

20. ZEGARRA VELÁSQUEZ, Roberto Luis. *Análisis y simulación fluidodinámica del fenómeno de cavitación en una turbina Francis*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica de Fluidos. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Perú, 2015. 101 p.

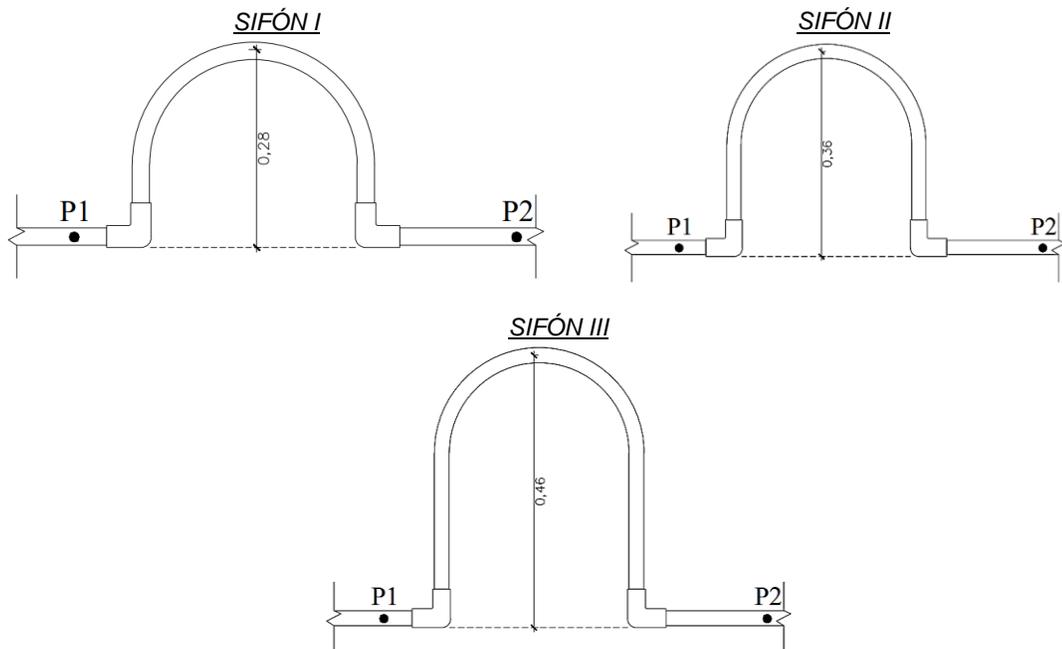
APÉNDICES

Apéndice 1. Rugosidad de tuberías según material

<i>Rugosidad de materiales de tubería</i>	
Material	ϵ (mm)
Plástico (PE/PVC)	0,0015
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0,010
Hierro galvanizado	0,150
Hierro fundido en asfalto	0,120
Concreto de acabado liso	0,025
Concreto armado (acabado liso y varios años de servicio)	0,300

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Variaciones de altura con los sifones



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCad 2018.

Apéndice 3. **Fotografía de cavidades en el sifón**



En la fotografía anterior, en el nivel del sifón, se observan las cavidades formadas durante los ensayos de laboratorio.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Fotografía de cavidades en la constricción y dilatación simultáneas**



Continuación del apéndice 4.

En la fotografía anterior, en el cambio de diámetro simultáneo, se visualiza el fenómeno de cavitación, lo cual valida los sonidos y vibraciones presenciadas durante los ensayos de laboratorio.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Toma de lecturas en tablero de piezómetros**



En la fotografía anterior, en el tablero de piezómetros, se aprecian las pérdidas de carga obtenidas en el sistema hidráulico debido a las variaciones de presión implementadas en este, durante los ensayos de laboratorio

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Formato de hoja de análisis datos en Excel 2016

Análisis y simulación del fenómeno de cavitación en los sistemas de conductos a presión
 Por: Karla Suceley Barrios Fernández

DATOS DEL SISTEMA

Altura de bomba a entrada de tubería (h): 0,000 m
 Gravedad: 0,00 m/s²
 Material de tubería:
 Rugosidad de tubería(ε) 0,00000

DÍAMETRO DE TUBERÍAS EMPLEADAS

ϕ_1 Tubería:
 Área Tubería ϕ_1 : m²
 D: mm

ϕ_2 Tubería:
 Área Tubería ϕ_2 : m²
 D: mm

DATOS DEL LÍQUIDO UTILIZADO

Líquido:
 Temperatura:
 Viscosidad: m²/s
 Densidad:
 Peso específico (γ): N/m³

DATOS DE PRESIONES ACTUANTES

$P_{atmosférica}$: N/m²
 $P_{atmosférica/\gamma}$: m

A través de la temperatura del agua se obtiene la presión de vapor (P_v)

P_v absoluta: N/m²
 P_v relativa: N/m²

NIVELES EN TRAMOS

Nivel 1: m
 Nivel 2: m
 Nivel 3: m

ALTURAS DE SIFONES

Sifón	Z _{inter} (m)
I	
II	
III	

Continuación del apéndice 6.

DATOS PRELIMINARES DE LAS CORRIDAS

SIFÓN I						
Lecturas de piezómetros: Sifón I (m)						
Corrida	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆
1						
2						
3						
4						
5						

Tiempos de aforo: Sifón I (s)						
Corrida	Volumen	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
1	0 L					
2	0 L					
3	0 L					
4	0 L					
5	0 L					

SIFÓN II						
Lecturas de piezómetros: Sifón II (m)						
Corrida	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆
1						
2						
3						
4						
5						

Tiempos de aforo: Sifón II (s)						
Corrida	Volumen	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
1	0 L					
2	0 L					
3	0 L					
4	0 L					
5	0 L					

SIFÓN III						
Lecturas de piezómetros: Sifón III (m)						
Corrida	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆
1						
2						
3						
4						
5						

Tiempos de aforo: Sifón III (s)						
Corrida	Volumen	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
1	0 L					
2	0 L					
3	0 L					
4	0 L					
5	0 L					

TIEMPO TOTAL Y CAUDAL

Se toma en cuenta que, el modelo es un sistema en serie, por lo tanto, en cada corrida el caudal será el mismo.

SIFÓN I		
Corrida	T _{total} (s)	Q (m ³ /s)
1		
2		
3		
4		
5		

SIFÓN II		
Corrida	T _{total} (s)	Q (m ³ /s)
1		
2		
3		
4		
5		

SIFÓN III		
Corrida	T _{total} (s)	Q (m ³ /s)
1		
2		
3		
4		
5		

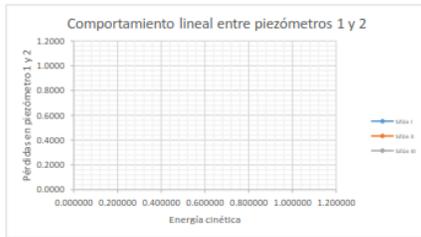
Continuación del apéndice 6.

PÉRDIDAS EN PIEZÓMETROS 1 Y 2 (RETORNO EN U)

SIFÓN I				
Corrida	$h_{L1} (P_1 - P_2)$	Q (m ³ /s)	V(m/s)	Energía Cinética (m)
1				
2				
3				
4				
5				

SIFÓN II				
Corrida	$h_{L1} (P_1 - P_2)$	Q (m ³ /s)	V(m/s)	Energía Cinética (m)
1				
2				
3				
4				
5				

SIFÓN III				
Corrida	$h_{L1} (P_1 - P_2)$	Q (m ³ /s)	V(m/s)	Energía Cinética (m)
1				
2				
3				
4				
5				

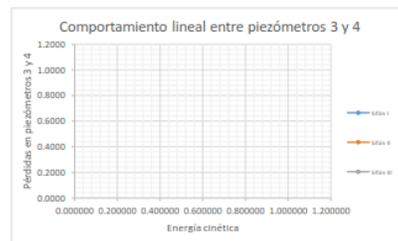


PÉRDIDAS EN PIEZÓMETROS 3 Y 4 (CONSTRICCIÓN Y DILATACIÓN SIMULTÁNEA)

SIFÓN I				
Corrida	$h_{L2} (P_3 - P_4)$	Q (m ³ /s)	V(m/s)	Energía Cinética (m)
1				
2				
3				
4				
5				

SIFÓN II				
Corrida	$h_{L2} (P_3 - P_4)$	Q (m ³ /s)	V(m/s)	Energía Cinética (m)
1				
2				
3				
4				
5				

SIFÓN III				
Corrida	$h_{L2} (P_3 - P_4)$	Q (m ³ /s)	V(m/s)	Energía Cinética (m)
1				
2				
3				
4				
5				



Continuación del apéndice 6.

PÉRDIDAS EN PIEZÓMETROS 5 Y 6 (CONSTRICCIÓN SÚBITA)

SIFÓN I

Corrida	$h_{12} (P_2 - P_1)$	Q (m ³ /s)	V(m/s)	Energía Cinética (m)
1				
2				
3				
4				
5				

SIFÓN II

Corrida	$h_{12} (P_2 - P_1)$	Q (m ³ /s)	V(m/s)	Energía Cinética (m)
1				
2				
3				
4				
5				

SIFÓN III

Corrida	$h_{12} (P_2 - P_1)$	Q (m ³ /s)	V(m/s)	Energía Cinética (m)
1				
2				
3				
4				
5				



VALORES DE GRÁFICA LINEAL SEGUN ANALISIS OBTENIDO

Análisis	Sifón	Pendiente lineal (x)
Retorno en U	I	
Retorno en U	II	
Retorno en U	III	

Análisis	Sifón	Pendiente lineal (x)
Constricción y dilatación simultánea	I	
Constricción y dilatación simultánea	II	
Constricción y dilatación simultánea	III	

Análisis	Sifón	Pendiente
Constricción súbita	I	
Constricción súbita	II	
Constricción súbita	III	

Nota: Los valores correspondientes a la pendiente m , también, son los valores experimentales del coeficiente k .

Continuación del apéndice 6.

ANÁLISIS DE PRESIÓN DE RETORNO EN U

Utilizando la ecuación de Bernoulli, se aplica la ecuación para el despeje de la presión intermedia 1

$$z_1 + \frac{p_1 \text{ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \left(z_{\text{inter}} + \frac{p_{\text{inter absoluta}}}{\gamma} + \frac{V_{\text{inter}}^2}{2g} \right) + hf$$

$$z_1 + \frac{p_1 \text{ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \left(z_{\text{inter}} + \frac{p_{\text{inter absoluta}}}{\gamma} + \frac{V_{\text{inter}}^2}{2g} \right) + k \frac{V_{\text{inter}}^2}{2g}$$

$$0 + \frac{p_1 \text{ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \left(z_{\text{inter}} + \frac{p_{\text{inter absoluta}}}{\gamma} + \frac{V_{\text{inter}}^2}{2g} \right) + (m/2) \frac{V_{\text{inter}}^2}{2g}$$

De las gráficas obtenidas, la pendiente dada por la ecuación de comportamiento lineal corresponde al

$$\frac{P_{\text{inter absoluta}}}{\gamma} = \frac{p_1 \text{ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} - z_{\text{inter}} - \frac{V_{\text{inter}}^2}{2g} - m \frac{V_{\text{inter}}^2}{2g}$$

Sifón:	I	Análisis:	Retorno en U			
x:	0	Z _{inter} :	0 Nivel 1: 0.000 m			
Corrida	P ₁ relativa/γ (m)	P ₁ absoluta/γ (m)	V ₁ (m/s)	V _{inter 1} (m/s)	P _{inter 1} absoluta/γ (m)	P _{inter 1} absoluta (N/m ²)
1						
2						
3						
4						
5						

Corrida	P _{vapor} relativa (N/m ²)	P _{inter 1} relativa (N/m ²)	P _{vapor} > P _{inter 1}
1			Incorrecto
2			Incorrecto
3			Incorrecto
4			Incorrecto
5			Incorrecto

Sifón:	II	Análisis:	Retorno en U			
x:	0	Z _{inter} :	0 Nivel 1: 0.000 m			
Corrida	P ₁ relativa/γ (m)	P ₁ absoluta/γ (m)	V ₁ (m/s)	V _{inter 1} (m/s)	P _{inter 1} absoluta/γ (m)	P _{inter 1} absoluta (N/m ²)
1						
2						
3						
4						
5						

Corrida	P _{vapor} relativa (N/m ²)	P _{inter 1} relativa (N/m ²)	P _{vapor} > P _{inter 1}
1			
2			
3			
4			
5			

Sifón:	III	Análisis:	Retorno en U			
x:	0	Z _{inter} :	0.0000 Nivel 1: 0.000 m			
Corrida	P ₁ relativa/γ (m)	P ₁ absoluta/γ (m)	V ₁ (m/s)	V _{inter 1} (m/s)	P _{inter 1} absoluta/γ (m)	P _{inter 1} absoluta (N/m ²)
1						
2						
3						
4						
5						

Corrida	P _{vapor} relativa (N/m ²)	P _{inter 1} relativa (N/m ²)	P _{vapor} > P _{inter 1}
1			Incorrecto
2			Incorrecto
3			Incorrecto
4			Incorrecto
5			Incorrecto

Continuación del apéndice 6.

ANÁLISIS EN CONSTRICCIÓN Y DILATACION SIMULTÁNEA

Una vez más, se emplea la ecuación de Bernoulli para hallar la presión intermedia en el punto 2 dentro de este tramo.

$$z_3 + \frac{P_3 \text{ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_3^2}{2g} = \left(z_{\text{inter } 2} + \frac{P_{\text{inter } 2 \text{ absoluta}}}{\gamma} + \frac{V_{\text{inter } 2}^2}{2g} \right) + hf$$

$$z_3 + \frac{P_3 \text{ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_3^2}{2g} = \left(z_{\text{inter } 2} + \frac{P_{\text{inter } 2 \text{ absoluta}}}{\gamma} + \frac{V_{\text{inter } 2}^2}{2g} \right) + k \frac{V_{\text{inter } 2}^2}{2g}$$

Teniendo en cuenta que: $z_3 = z_{\text{inter } 2}$

$$0 + \frac{P_3 \text{ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_3^2}{2g} = \left(0 + \frac{P_{\text{inter } 2 \text{ absoluta}}}{\gamma} + \frac{V_{\text{inter } 2}^2}{2g} \right) + m \frac{V_{\text{inter } 2}^2}{2g}$$

De las gráficas obtenidas, la pendiente dada por la ecuación de comportamiento lineal corresponde al valor de "m"

$$\frac{P_{\text{inter } 2 \text{ absoluta}}}{\gamma} = \frac{P_3 \text{ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_3^2}{2g} - \frac{V_{\text{inter } 2}^2}{2g} - m \frac{V_{\text{inter } 2}^2}{2g}$$

Sifón:	I	Análisis:	Constricción y dilatación simultánea			
x:	0	$z_{\text{inter } 2}$:	0	Nivel 2:	0.000 m	
Corrida	$P_3 \text{ relativa}/\gamma$ (m)	$P_3 \text{ absoluta}/\gamma$ (m)	v_3 (m/s)	$V_{\text{inter } 2}$ (m/s)	$P_{\text{inter } 2}$ absoluta/ γ (m)	$P_{\text{inter } 2}$ absoluta (N/m ²)
1						
2						
3						
4						
5						

Corrida	$P_{\text{inter } 2 \text{ absoluta}}$ (N/m ²)	$P_{\text{vapor relativa}}$ (N/m ²)	$P_{\text{inter } 2 \text{ relativa}}$ (N/m ²)	$P_{\text{vapor}} > P_{\text{inter } 2}$
1				Incorrecto
2				Incorrecto
3				Incorrecto
4				Incorrecto
5				Incorrecto

Sifón:	II	Análisis:	Constricción y dilatación simultánea			
x:	0	$z_{\text{inter } 2}$:	0	Nivel 2:	0.000 m	
Corrida	$P_3 \text{ relativa}/\gamma$ (m)	$P_3 \text{ absoluta}/\gamma$ (m)	v_3 (m/s)	$V_{\text{inter } 2}$ (m/s)	$P_{\text{inter } 2}$ absoluta/ γ (m)	$P_{\text{inter } 2}$ absoluta (N/m ²)
1						
2						
3						
4						
5						

Corrida	$P_{\text{vapor relativa}}$ (N/m ²)	$P_{\text{inter } 2}$ relativa (N/m ²)	$P_{\text{vapor}} > P_{\text{inter } 2}$
1			Incorrecto
2			Incorrecto
3			Incorrecto
4			Incorrecto
5			Incorrecto

Sifón:	III	Análisis:	Constricción y dilatación simultánea			
x:	0	$z_{\text{inter } 2}$:	0	Nivel 2:	0.000 m	
Corrida	$P_3 \text{ relativa}/\gamma$ (m)	$P_3 \text{ absoluta}/\gamma$ (m)	v_3 (m/s)	$V_{\text{inter } 2}$ (m/s)	$P_{\text{inter } 2}$ absoluta/ γ (m)	$P_{\text{inter } 2}$ absoluta (N/m ²)
1						
2						
3						
4						
5						

Corrida	$P_{\text{vapor relativa}}$ (N/m ²)	$P_{\text{inter } 2}$ relativa (N/m ²)	$P_{\text{vapor}} > P_{\text{inter } 2}$
1			Incorrecto
2			Incorrecto
3			Incorrecto
4			Incorrecto
5			Incorrecto

Continuación del apéndice 6.

ANÁLISIS DE COEFICIENTE K EN CONSTRICCIÓN SUBITA

Empleando la ecuación de Bernoulli en conjunto con la ecuación de las pérdidas menores, se despeja para hallar el coeficiente k

$$Z_5 + \frac{P_5 \text{ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_5^2}{2g} = Z_6 + \frac{P_6 \text{ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_6^2}{2g} + hf$$

Teniendo en cuenta que:

$$z_5 = z_6$$

$$\frac{P_5 \text{ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_5^2}{2g} = \frac{P_6 \text{ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_6^2}{2g} + hf$$

$$hf = \frac{P_5 \text{ absoluta}}{\gamma} + \frac{V_5^2}{2g} - \frac{P_6 \text{ absoluta}}{\gamma} - \frac{V_6^2}{2g}$$

$$hf = \left(\frac{P_5 \text{ absoluta}}{\gamma} - \frac{P_6 \text{ absoluta}}{\gamma} \right) - \left(\frac{V_6^2 - V_5^2}{2g} \right)$$

$$hf = k \frac{V_6^2}{2g}$$

Igualando ecuaciones: $hf = hf$

$$k \frac{V_6^2}{2g} = \left(\frac{P_5 \text{ absoluta}}{\gamma} - \frac{P_6 \text{ absoluta}}{\gamma} \right) - \left(\frac{V_6^2 - V_5^2}{2g} \right)$$

$$k = \left[\left(\frac{P_5 \text{ absoluta}}{\gamma} - \frac{P_6 \text{ absoluta}}{\gamma} \right) - \left(\frac{V_6^2 - V_5^2}{2g} \right) \right] \cdot \left[\frac{2g}{V_6^2} \right]$$

Sifón:	I	Análisis: Constricción súbita				
x:	0	Z _{sección:}	0	Nivel 3:	0.000 m	
Corrida	P ₅ relativa/γ (m)	P ₆ relativa/γ (m)	P ₅ absoluta/γ (m)	P ₆ absoluta/γ (m)	v ₅ (m/s)	v ₆ (m/s)
1						
2						
3						
4						
5						

Sifón:	II	Análisis: Constricción súbita			
x:	0	Z _{sección:}	0	Nivel 3:	0.000 m
P ₅ relativa/γ (m)	P ₆ relativa/γ (m)	P ₅ absoluta/γ (m)	P ₆ absoluta/γ (m)	v ₅ (m/s)	v ₆ (m/s)

Sifón:	III	Análisis: Constricción súbita			
x:	0	Z _{sección:}	0	Nivel 3:	0.000 m
P ₅ relativa/γ (m)	P ₆ relativa/γ (m)	P ₅ absoluta/γ (m)	P ₆ absoluta/γ (m)	v ₅ (m/s)	v ₆ (m/s)

VALORES FINALES	SIFÓN I	SIFÓN II	SIFÓN III
Corrida	k ₁	k ₂	k ₃
1			
2			
3			
4			
5			
k_{total}			

Continuación del apéndice 6.

COMPORTAMIENTO DE FLUJO SEGUN REYNOLDS

Para conocer el tipo de flujo dentro del sistema se emplea la ecuación de reynolds

$$R_e = \frac{VD}{\nu}$$

Sifón I	Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3	
	Corrida	Flujo	Flujo	Flujo	Flujo	Flujo
1						
2						
3						
4						
5						

Sifón II	Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3	
	Corrida	Flujo	Flujo	Flujo	Flujo	Flujo
1						
2						
3						
4						
5						

Sifón III	Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3	
	Corrida	Flujo	Tipo de Flujo	Flujo	Flujo	Flujo
1						
2						
3						
4						
5						

FACTOR DE PÉRDIDAS MENORES EN OBSTACULOS DE CADA NIVEL

Debido a que el sistema es pequeño las pérdidas menores se convierten en las pérdidas principales que actúan dentro de este, por ello, se busca conocer el coeficiente (k) de forma teórica.

$$h_l = k \frac{V^2}{2g} \quad \rightarrow \quad k = \frac{h_l}{V^2 / 2g}$$

Sifón I	Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3		
	Corrida	h_l (m)	k_1	h_l (m)	k_2	h_l (m)	k_3
1							
2							
3							
4							
5							
		k_{total1}		k_{total2}		k_{total3}	

Sifón II	Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3		
	Corrida	h_l (m)	k_1	h_l (m)	k_2	h_l (m)	k_3
1							
2							
3							
4							
5							
		k_{total1}		k_{total2}		k_{total3}	

Sifón III	Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3		
	Corrida	h_l (m)	k_1	h_l (m)	k_2	h_l (m)	k_3
1							
2							
3							
4							
5							
		k_{total1}		k_{total2}		k_{total3}	

Continuación del apéndice 6.

ERRORES EN COEFICIENTE DE PÉRDIDAS MENORES

Error absoluto por: Igualación de ecuaciones entre Bernoulli y las pérdidas menores Vs. Gráfica lineal

Se deduce el error absoluto con el fin de conocer la dispersión entre los datos experimentales y los valores de la ecuación generada por la igualación de pérdidas.

$$\text{Error absoluto} = k_{\text{medido}} - k_{\text{real}}$$

En donde:

k_{medido} : Es el valor obtenido de la gráfica de comportamiento lineal

k_{real} : Es el valor obtenido mediante el despeje de la fórmula establecida

Error absoluto	Constricción súbita (k_3)
Sifón I	
Sifón II	
Sifón III	

Error relativo por: Ecuación de pérdidas menores Vs. Gráfica lineal

Se deduce un porcentaje de error relativo que permite observar la desviación entre el dato real y el medido, con respecto al valor real, con el fin de tener un indicador de la precisión y calidad de una medida.

$$\% \text{ Error relativo} = \frac{k_{\text{medido}} - k_{\text{real}}}{k_{\text{real}}} * 100\%$$

Error relativo	k_1	k_2	k_3
Sifón I			
Sifón II			
Sifón III			

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Diámetros según la AMANCO

Información AMANCO sobre diámetros	
Diámetro nominal	
Mm	Plg
12	½
18	¾
25	1
31	1 ¼
38	1 ½
50	2

Fuente: AMANCO. *Lista de precios*. p. 31.

Anexo 2. Peso específico del agua

Peso específico del agua según la temperatura	
Temperatura (°C)	Peso específico (N/m³)
0	9 800
5	9 810
10	9 810
15	9 810
20	9 790
25	9 780
30	9 770
35	9 750
40	9 730
45	9 710
50	9 690
55	9 670
60	9 650
65	9 620
70	9 590
75	9 560
80	9 530
85	9 500

Continuación del anexo 2.

90	9 470
95	9 440
100	9 400

Fuente: MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. p. 589.

Anexo 3. **Peso específico del agua**

Presión de vapor del agua, según distintas temperaturas	
Temperatura (°C)	Pv (Pa)
1	656,60
2	705,50
3	757,50
4	812,90
5	871,80
6	934,50
7	1 001,20
8	1 072,00
9	1 147,20
10	1 227,00
11	1 311,60
12	1 401,40
13	1 496,50
14	1 597,30
15	1 703,90
16	1 816,80
17	1 936,20
18	2 062,00
19	2 196,00
20	2 337,00
21	2 485,00
22	2 642,00
23	2 808,00
24	2 982,00
25	3 166,00
26	3 360,00
27	3 564,00
28	3 778,00
29	4 004,00
30	4 241,00
31	4 491,00

Continuación del anexo 3.

32	4 753,00
33	5 029,00
34	5 318,00
35	5 622,00
36	5 940,00
37	6 274,00
38	6 624,00
39	6 991,00
40	7 375,00
41	7 777,00
42	8 198,00
43	8 639,00
44	9 100,00
45	9 582,00
46	10 086,00
47	10 612,00
48	11 162,00
49	11 736,00
50	12 335,00
51	12 961,00
52	13 613,00
53	14 293,00
54	15 002,00
55	15 741,00
56	16 511,00
57	17 313,00
58	18 147,00
59	19 016,00
60	19 920,00
61	20 860,00
62	21 840,00
63	22 860,00
64	23 910,00
65	25 010,00
66	26 150,00
67	27 330,00
68	28 560,00
69	29 840,00
70	31 160,00
71	32 530,00
72	33 960,00
73	35 430,00
74	36 960,00
75	38 550,00

Continuación del anexo 3.

76	40 190,00
77	41 890,00
78	43 650,00
79	45 470,00
80	47 360,00
81	49 310,00
82	51 330,00
83	53 420,00
84	55 570,00
85	57 800,00
86	60 110,00
87	62 490,00
88	64 950,00
89	67 490,00
90	70 110,00
91	72 810,00
92	75 610,00
93	78 490,00
94	81 460,00
95	84 530,00
96	87 690,00
97	90 940,00
98	94 300,00
99	97 760,00
100	101 330,00

Fuente: MATAIX, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. p. 321-322.