



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

**DESARROLLO DE UN EQUIPO Y UNA PRÁCTICA EXPERIMENTAL DIDÁCTICA
PARA DEMOSTRAR EL FENÓMENO DE CAVITACIÓN DE FORMA FÍSICA**

Leda Marysol Gómez Montenegro

Asesorado por el Ing. José Manuel Tay Oroxom

Guatemala, abril de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DESARROLLO DE UN EQUIPO Y UNA PRÁCTICA EXPERIMENTAL DIDÁCTICA
PARA DEMOSTRAR EL FENÓMENO DE CAVITACIÓN DE FORMA FÍSICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

LEDA MARYSOL GÓMEZ MONTENEGRO

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ MANUEL TAY OROXOM

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, ABRIL DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

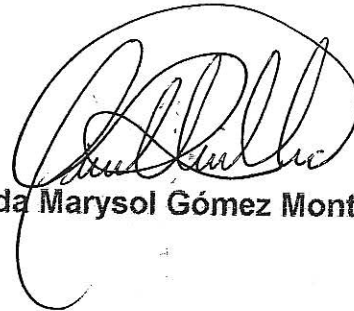
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Dinna Lissette Estrada Moreira de Rossal
EXAMINADOR	Ing. Erwin Manuel Ortiz Castillo
EXAMINADOR	Ing. Federico Guillermo Salazar Rodríguez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

DESARROLLO DE UN EQUIPO Y UNA PRÁCTICA EXPERIMENTAL DIDÁCTICA PARA DEMOSTRAR EL FENÓMENO DE CAVITACIÓN DE FORMA FÍSICA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 15 de junio de 2012.



Leda Marysol Gómez Montenegro

Guatemala 21 de enero del 2013

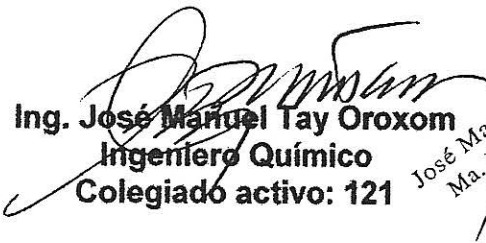
Universidad de San Carlos de Guatemala
Director de la Escuela de Ingeniería Química
Ingeniero. Víctor Monzón
Presente.

Ingeniero Monzón:

Por este medio apruebo el informe final del trabajo de graduación "DESARROLLO DE UN EQUIPO Y UNA PRÁCTICA EXPERIMENTAL DIDÁCTICA PARA DEMOSTRAR EL FENÓMENO DE CAVITACIÓN DE FORMA FÍSICA". Desarrollado por Leda Marysol Gómez Montenegro, con carné estudiantil 2004-13528, para que sea presentado y defendido ante la terna evaluadora establecida.

Sin otro particular reciba un cordial saludo.

Atentamente:


Ing. José Manuel Tay Oroxom
Ingeniero Químico
Colegiado activo: 121

José Manuel Tay Oroxom
Ma. Ingeniero Químico
Colegiado No. 121



Guatemala, 20 de febrero de 2013
 Ref. EI.Q.TG-IF.008.2013

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
 DIRECTOR
 Escuela Ingeniería Química
 Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el Acta TG-024-2012-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por la estudiante universitaria: **Leda Marysol Gómez Montenegro**

Identificada con número de carné: **2004-13528**

Previo a optar al título de INGENIERA QUÍMICA.

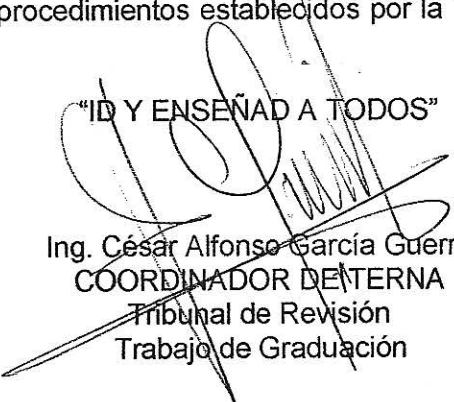
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**DESARROLLO DE UN EQUIPO Y UNA PRÁCTICA EXPERIMENTAL DIDÁCTICA
 PARA DEMOSTRAR EL FENÓMENO DE CAVITACIÓN DE FORMA FÍSICA**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **José Manuel Tay Oroxom.**

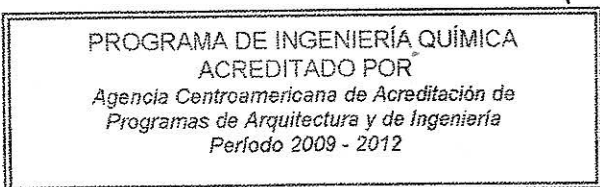
Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


 Ing. César Alfonso García Guerra
 COORDINADOR DE TERNA
 Tribunal de Revisión
 Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de
 Programas de Arquitectura y de Ingeniería



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Ref.EIQ.TG.090.2013

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **LEDA MARYSOL GÓMEZ MONTENEGRO** titulado: "**DESARROLLO DE UN EQUIPO Y UNA PRÁCTICA EXPERIMENTAL DIDÁCTICA PARA DEMOSTRAR EL FENÓMENO DE CAVITACIÓN DE FORMA FÍSICA**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, abril 2013



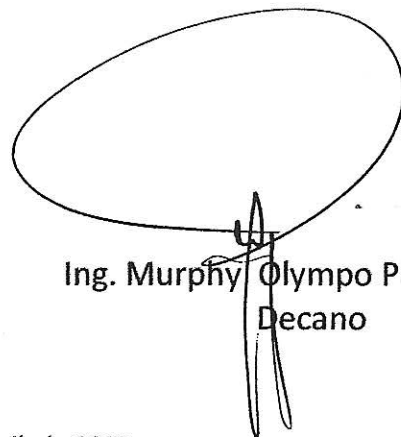
Cc: Archivo
VMMV/ale



DTG. 270 .2013

El Decano 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 Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DESARROLLO DE UN EQUIPO Y UNA PRÁCTICA EXPERIMENTAL DIDÁCTICA PARA DEMOSTRAR EL FENÓMENO DE CAVITACIÓN DE FORMA FÍSICA**, presentado por la estudiante universitaria: **Leda Marysol Gómez Montenegro**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 15 de abril de 2013

/gdech

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por la sabiduría, entendimiento y discernimiento en cada instante de mi vida, por escuchar cada una de mis oraciones y hacer ligera mí carga.
- Mis padres** Carlos Gómez Lima y Sandra Jeaneth Montenegro Duque por la formación, lealtad confianza y paciencia en cada instante de mi trayectoria estudiantil. Infinitamente agradecida por creer que un día la meta sería culminada.
- Universidad de San Carlos de Guatemala** Por darme la oportunidad de pertenecer a tan honorable casa de estudios, la cual fue testigo del arduo camino recorrido. Hoy me complace ser una sancarlista que la representa con orgullo. Id y enseñad a todos.
- Mis catedráticos** José Manuel Tay, por recorrer la milla extra, compartir sin recelo sus conocimientos y formarme en el área profesional.
- Mis amigos** Melany Adaira López, por su paciencia y lealtad desde el primer día de la licenciatura hasta el día de hoy.

En general

A todas las personas que estuvieron presentes en distintas etapas de mi vida como ángeles enviados por Dios que hicieron que los días nublados resplandecieran.

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por darme la bendición de un nuevo día de vida, lo cual lo consideré como una oportunidad más para luchar incansablemente por los sueños que al momento de ser míos fueron de mis padres.

Mis padres

Carlos Gómez Lima y Sandra Jeaneth Montenegro Duque, por que este logro no es mío si no de ustedes, que nunca dejaron de creer en mí y se despojaron de todo lo necesario para llegar a la meta, con toda la gratitud de mi corazón, gracias.

Mis hermanos

En especial a Marco Manolo Gómez Montenegro, por creer en mí y ser luz incondicional en mis días oscuros. Estuardo, Vanezza y Marlón Gómez, por ser parte de mi vida.

Mi novio

Abner Raúl Lima López por ser mi amigo, compañero, consuelo y soporte incondicional en esta etapa de mi vida.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS/HIPÓTESIS	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. Recurso didáctico	9
2.2. Cavitación	9
2.2.1. Etapas de la cavitación	11
2.2.2. Descenso de la presión de vapor como efecto de un estrangulamiento	12
2.3. Evaluación de la cavitación en bombas	14
2.4. Altura manométrica de la bomba	19
2.5. Altura manométrica de la instalación	20
2.6. Cavitación en la admisión de la bomba	24
2.7. Cavitación en la descarga de la bomba	25
3. DISEÑO METODOLÓGICO	27
3.1. Variables	27
3.2. Delimitación del campo de estudio	28
3.3. Recursos humanos disponibles	30

3.4.	Recursos materiales	31
3.5.	Técnica utilizada	32
3.6.	Cualitativa.....	33
3.7.	Cuantitativa	33
3.8.	Recolección y ordenamiento de la información.....	33
3.9.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	35
3.10.	Análisis estadístico	36
3.10.1.	Dato promedio	37
3.10.2.	Desviación estándar	37
3.10.3.	Incertidumbre absoluta	38
4.	RESULTADOS	41
4.1.	Práctica experimental	55
4.1.1.	Tema	55
4.1.2.	Objetivos	55
4.1.3.	Procedimiento de cálculo.....	56
4.2.	Guía de operación y mantenimiento	59
4.2.1.	Mantenimiento preventivo.....	60
4.2.2.	Mantenimiento predictivo.....	61
4.2.3.	Mantenimiento correctivo.....	62
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	65
	CONCLUSIONES	69
	RECOMENDACIONES	71
	BIBLIOGRAFÍA	73
	APÉNDICES	75
	ANEXOS	99

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Elevación frontal del sistema montado por el Ing. Jorge Túchez.....	2
2.	Gráfica NPSH disponible contra caudal, ensayo variando el caudal	3
3.	Representación esquematiza de los elementos de la instalación.....	4
4.	Comportamiento de la presión sin cavitación en función del tiempo.....	6
5.	Comportamiento de la presión cavitando en función del tiempo	6
6.	Imagen del fluido en la tubería de descarga y el oscilador que forman las burbujas durante la cavitación y el cambio de las burbujas al variar el caudal	7
7.	Representación física para la aparición de cavitación.....	10
8.	Etapas del fenómeno de cavitación	11
9.	Balance energético	12
10.	Balance energético y etapas de la cavitación	13
11.	Desarrollo del colapso de una burbuja.....	14
12.	Esquema de la instalación de bombeo	15
13.	Representación de los valores NPSH en función del caudal.....	18
14.	Curva característica de una bomba centrífuga.....	20
15.	Curva característica de la instalación.....	21
16.	Curva característica de la instalación y de la bomba	22
17.	Curva característica de la instalación al modificarse la diferencia de presiones o alturas.....	23
18.	Curva característica de la instalación al variar la pérdida de carga.....	24
19.	Vista frontal del equipo instalado en el Laboratorio de Ingeniería Química	28

20.	Planta del equipo instalado en el Laboratorio de Ingeniería Química .	29
21.	Perfil izquierdo del equipo instalado en el Laboratorio de Ingeniería Química	29
22.	Perfil derecho del equipo instalado en el Laboratorio de Ingeniería Química	30
23.	Diagrama de la tabulación ordenamiento y procesamiento de la información experimental recolectada	36
24.	Diagrama del equipo diseñado e instalado	41
25.	Comparación de la presión en la succión de la bomba y la presión de vapor del agua a 20 °C	42
26.	Comparación de la presión en la succión de la bomba y la presión de vapor del agua a 26 °C	43
27.	Comparación de la presión en la succión de la bomba y la presión de vapor del agua a 40 °C	44
28.	Comparación de la pérdida de carga ocasionada por la válvula de estrangulación y los accesorios en la succión de la bomba a 20 °C	45
29.	Comparación de la pérdida de carga ocasionada por la válvula de estrangulación y los accesorios en la succión de la bomba a 26 °C	46
30.	Comparación de la pérdida de carga ocasionada por la válvula de estrangulación y los accesorios en la succión de la bomba a 40 °C	47
31.	Comparación del NPSH disponible y requerido a 20°C	48
32.	Comparación del NPSH disponible y requerido a 26°C	49
33.	Comparación del NPSH disponible y requerido a 40°C	50
34.	Comparación de la curva característica de la bomba e instalación a 20°C	51
35.	Comparación de la curva característica de la bomba e	

	instalación a 26°C.....	52
36.	Comparación de la curva característica de la bomba e instalación a 40°C.....	53
37.	Grado de apropiación del tópico	54
38.	Diagrama de procedimiento de cálculo de pérdida de carga.....	56
39.	Diagrama de cálculo de NPSH disponible y requerido	57
40.	Diagrama de operación del equipo de cavitación.....	59
41.	Esquema del equipo de cavitación	63

TABLAS

I.	Datos registrados durante la regulación del voltaje de alimentación al motor de la bomba.....	5
II.	Valores de los parámetros fundamentales del cálculo hidráulico.....	5
III.	Definición operacional de variables	27
IV.	Recursos materiales utilizados	31
V.	Representación de la tabulación de tratamientos y repeticiones ..	34
VI.	Representación de la tabulación de variables experimentales	35
VII.	Análisis estadístico para una temperatura de operación de 20 °C.....	39
VIII.	Análisis estadístico para una temperatura de operación de 26 °C.....	39
IX.	Análisis estadístico para una temperatura de operación de 40 °C.....	40
X.	Caudal y altura máxima de operación a diferentes temperaturas .	54
XI.	Descripción de ecuaciones utilizadas en las figuras 38 y 39	58
XII.	Actividades de mantenimiento preventivo	60
XIII.	Actividades de mantenimiento predictivo	61

XIV.	Actividades de mantenimiento correctivo.....	62
XV.	Descripción de los componentes del equipo de cavitación	64

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
ρ	Densidad
GPM	Galones por minuto
°C	Grados Celsius
kg	Kilogramo
PSI	Libra sobre pulgada cuadrada
m.c.a.	Metro columna de agua
N	Newton
m	Metro
%	Porcentaje
s	Segundos

GLOSARIO

Capacidad	Caudal másico del fluido en movimiento a través de la bomba centrífuga.
Carga	Diferencia de presión total medida en la succión y descarga de la bomba, expresada en altura equivalente de columna del fluido.
Ebullición	Temperatura a la cual la presión de vapor de un líquido es igual a la presión atmosférica.
Evaporación	Cambio de estado de agregación de líquido a gaseoso a presión y temperatura constante.
Grado de apropiación	Posibilidad que un estudiante pueda interpretar, calcular y generalizar el comportamiento de equipos similares relacionados con el fenómeno. (Definición desarrollada por la autora que se ajusta al presente trabajo).
Implosión	Colapso instantáneo de una burbuja cuya presión interior es menor que la externa.
Presión absoluta	Presión medida en el vacío perfecto.

Presión barométrica	Presión atmosférica por encima del vacío perfecto.
Presión de vapor	Presión a la cual el vapor y el líquido de un componente puro se encuentran en equilibrio.
Presión manométrica	Presión medida por encima de la atmosférica.
Vacío	Depresión por debajo del nivel atmosférico.

RESUMEN

El objetivo del trabajo de graduación fue la demostración del fenómeno de la cavitación en forma física y visual, por medio de un equipo que fue diseñado e instalado con los componentes necesarios para medir las variables requeridas para el cumplimiento de propósitos establecidos.

Entre los componentes principales del equipo instalado se encuentra una bomba centrífuga de 0,5 caballos de fuerza, dos manovacúómetros y tubería de pírrex en la succión y en la descarga, tanque pírrex que permite la recirculación del agua en el sistema y una válvula de bola colocada previo a la tubería de succión, esta al estrangular el paso del fluido permite que la presión en ese punto disminuya por debajo de la presión de vapor del agua a la temperatura de operación, y como consecuencia la formación de burbujas que son visualizadas en la tubería de pírrex.

Las variables medidas que permitieron la obtención de los resultados cuantitativos fueron; la presión en la succión y descarga de la bomba, temperatura del fluido y flujo másico, además de las especificaciones propias de la bomba.

Se desarrolló una práctica experimental teórica-práctica, la cual fue ejecutada por sesenta estudiantes del Laboratorio de Ingeniería Química 1 (grupos de trabajo de cinco integrantes) quienes operaron el equipo instalado para obtener las variables de interés mencionadas.

La práctica experimental constó de dos etapas. La primera fue la realización de un informe de preparación. El objetivo principal de este, fue el desarrollo de un análisis experimental que permitió que los datos recolectados y la manipulación del equipo fuera la correcta para cumplir con los objetivos planteados. La segunda continúa con la recolección de datos porque a partir de estos se realizó un informe técnico. En este se plasmaron los resultados obtenidos y el grado de apropiación de los estudiantes del tópico estudiado.

Se concluye que la cavitación es un fenómeno físico susceptible de ser desarrollado bajo condiciones de laboratorio utilizando equipos y accesorios de uso común, que permitió el desarrollo de prácticas experimentales con objetivos establecidos. El efecto del incremento de la temperatura favorece la observación física del fenómeno de la cavitación.

A partir del procedimiento de evaluación se demuestra con los resultados estadísticos un grado de apropiación del 93 %, observando que un 40 % de los estudiantes tuvieron una apropiación muy buena, 53 % buena y 7 % deficiente. Los resultados obtenidos demuestran el cumplimiento de la hipótesis científica planteada, al demostrar en forma física el fenómeno de cavitación.

OBJETIVOS

General

Desarrollar un equipo didáctico para demostrar el fenómeno de la cavitación en forma física y visual, encontrar relaciones matemáticas y tendencias gráficas en una práctica experimental.

Específicos

1. Diseñar y construir un equipo que integre los componentes materiales que se requieren para demostrar en forma física y visual la cavitación.
2. Evaluar las condiciones de presión, temperatura y caudal en las que se produce el fenómeno.
3. Ilustrar mediante métodos gráficos las tendencias y comportamientos de las variables dependientes con la variación de las variables independientes.
4. Desarrollar una práctica experimental utilizando el equipo armado para estudiantes del Laboratorio de Ingeniería Química.

5. Evaluar el grado de apropiación del conocimiento adquiridos en el desarrollo de la práctica experimental de los estudiantes participantes por medio de una evaluación formativa y a través del desarrollo de un informe técnico generado a partir de los datos experimentales.
6. Elaborar una guía de operación y mantenimiento del equipo desarrollado.

HIPÓTESIS

Se puede producir y estudiar el fenómeno de la cavitación en un equipo armado e instalado en el Laboratorio de Ingeniería Química, para que los estudiantes se apropien del conocimiento y el control de este.

INTRODUCCIÓN

Cuando un punto de un sistema alcanza una presión inferior a la presión de saturación de vapor el líquido, este se evapora originando en el interior del líquido cavidades de vapor, de ahí el nombre de cavitación. En el interior del fluido existen zonas en que predomina un gradiente fuerte de presiones que aceleran las burbujas y producen un impacto en el contorno.

Debido a que las burbujas del vapor ocupan un volumen mayor que el líquido, ocurre una reducción del flujo. Conforme las burbujas se mueven del área de baja presión hacia el área de alta presión, el vapor regresa a la fase líquida, esta condensación genera una poderosa onda de choque en el líquido que puede llegar a remover partículas en las superficies sólidas circundantes creando cavidades, lo cual ocurre en turbinas hidráulicas, hélices de barcos, impulsores de bombas y otras superficies sobre las cuales se encuentran líquidos de alta velocidad con cambios de presión.

La cavitación reduce la eficiencia de operación del equipo de bombeo. También produce un comportamiento inestable o menor en la presión de descarga y el consumo de energía se torna errático.

La única manera de prevenir los efectos indeseables de la cavitación es asegurar que el NPSH disponible en el sistema sea mayor que el NPSH requerido por la bomba. Cuando el NPSH (carga neta positiva en la aspiración disponible) es bajo, es apropiado decir que la presión del líquido está a un valor igual o menor que su presión de vapor.

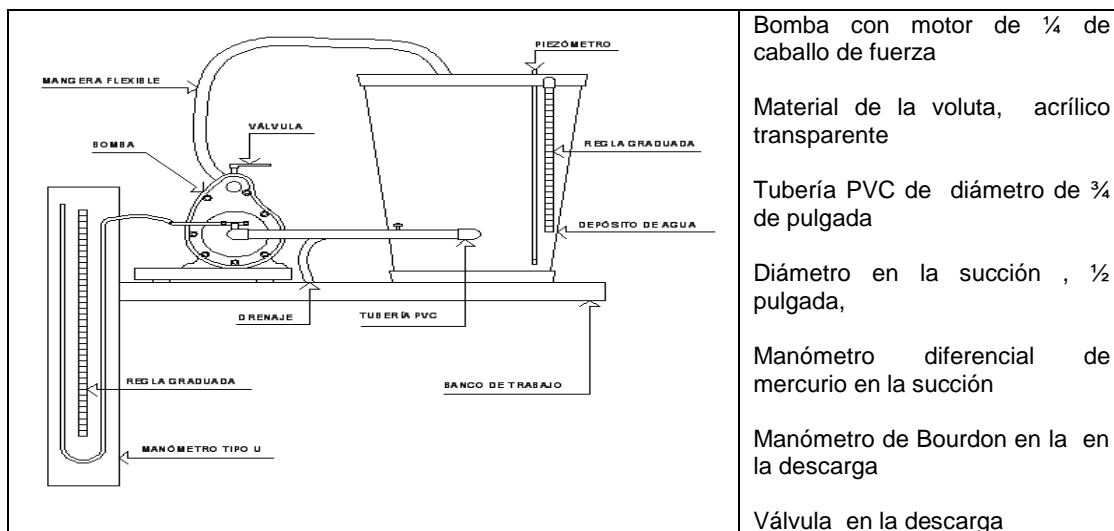
1. ANTECEDENTES

Se han presentado estudios para la implementación de prácticas experimentales aplicadas a un laboratorio de operaciones unitarias, no obstante no se ha desarrollado un estudio a nivel de trabajo de graduación que ayude a comprender el fenómeno de cavitación, sin embargo, en laboratorios de hidráulica si.

- La función docente en el diseño y montaje del evaporador de película ascendente en el laboratorio de operaciones unitarias de la escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Trabajo de graduación presentado por Héctor Garrido, Universidad de San Carlos, 1991.
- Propuesta de una práctica experimental de control automático del proceso de transferencia de calor, en el intercambiador de tubos concéntricos del Laboratorio de Operaciones Unitarias en la Universidad de San Carlos. Trabajo de graduación presentado por David Cerezo. Universidad de San Carlos, 2005.
- Elaboración de un manual de prácticas de transferencia de masa y energía usando el software Super Pro-Designer. Trabajo de graduación presentado por Oscar Flores Sierra, Universidad Rafael Landívar, 2006.
- Aplicación del diseño experimental en el desarrollo de las prácticas internas, en el área de operaciones unitarias. Trabajo de graduación presentado por Memphis Reyes. Universidad de San Carlos, 2009.

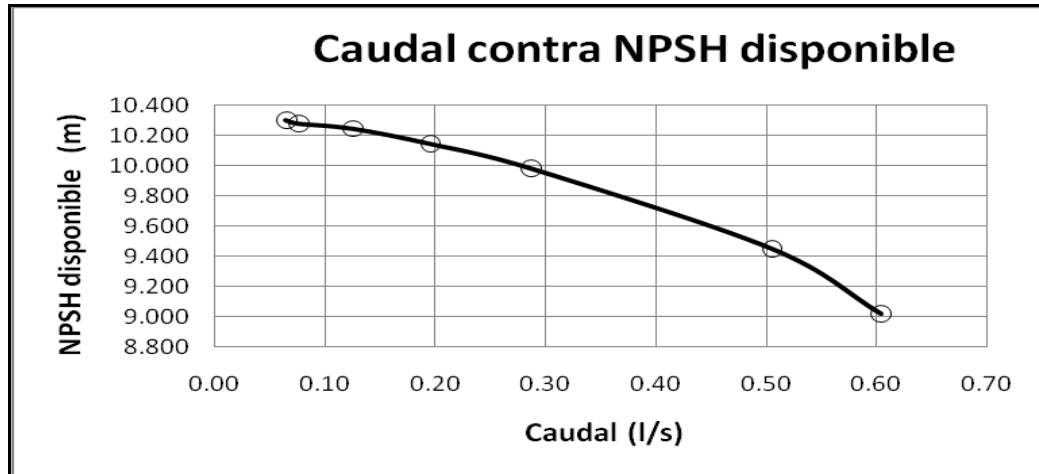
- Diseño de la práctica simulada de refrigeración en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Trabajo de graduación presentado por Adolfo Macario Castro. Universidad de San Carlos, 2009.
- Estudio y experimento del fenómeno de cavitación en el Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Trabajo de graduación presentado por Jorge Mejía Túchez. Universidad de San Carlos, 2010.

Figura 1. **Elevación frontal del sistema montado por el Ing. Jorge Túchez**



Fuente: estudio y experimento del fenómeno de cavitación en el Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ingeniería Universidad de San Carlos. p. 63.

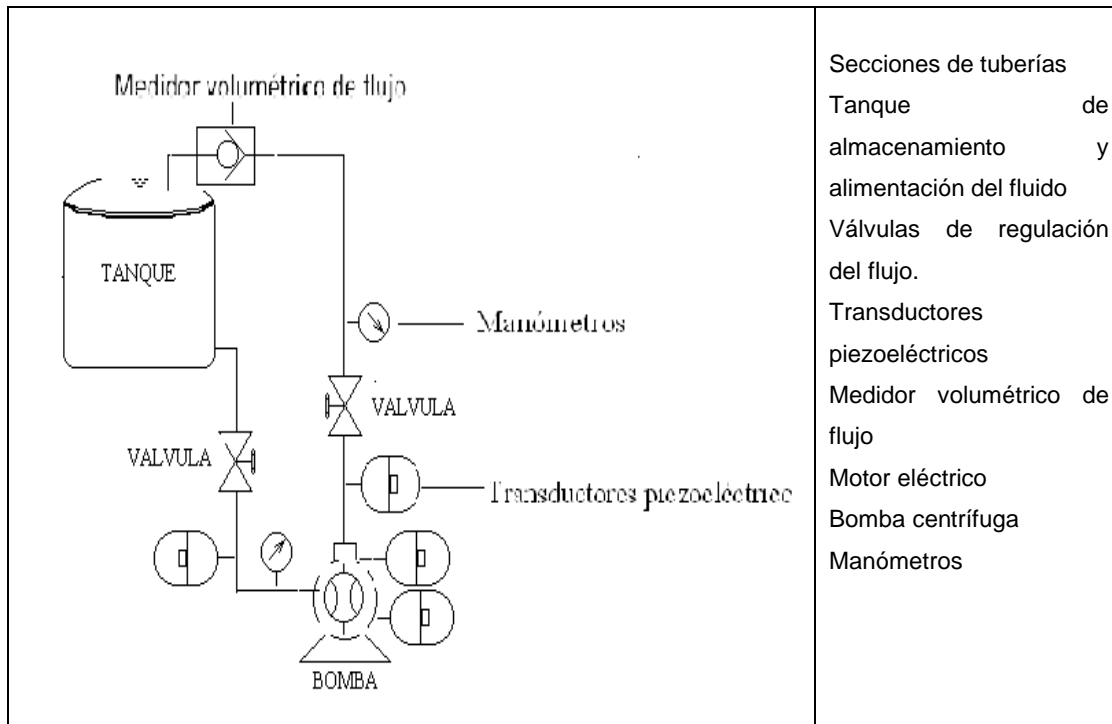
Figura 2. **Gráfica NPSH disponible contra caudal, ensayo variando el caudal**



Fuente: estudio y experimento del fenómeno de cavitación en el Laboratorio de Hidráulica facultad de Ingeniería Universidad de San Carlos. p. 78.

- Un experimento de enseñanza e investigación sobre el fenómeno de la cavitación en bombas centrífugas por Jorge Luis Reyes De la Cruz (Facultad de Metalurgia y Electromecánica, Departamento de Mecánica, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba, Las Coloradas) Gerardo Ruiz Chavarría y Sergio Hernández Zapata (Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito exterior S/N de Ciudad Universitaria, Distrito Federal).

Figura 3. **Representación esquematiza de los elementos de la instalación**



Fuente: REYES DE LA CRUZ, Jorge Luis; RUIZ CHAVARRÍA, Gerardo y HERNÁNDEZ ZAPATA. Apuntes de máquinas hidráulicas. p. 917.

Tabla I. **Datos registrados durante la regulación del voltaje de alimentación al motor de la bomba**

Regulación de válvula	Caudal g/min	Pts(Psi) Canal 1	Pvs(Psi) Canal 0	Pvd(Psi) Canal 2	Ptd(Psi) Canal 3	Voltaje (Volt)	Temp (°C)
Cierre de la válv 3/4	0,07	9.54	0.33	-2.87	20.6	127	8
Cierre de la válv 3/4	0,07	9.54	1.00	-2.87	20.6	120	9
Cierre de la válv 3/4	0,07	9.54	0.33	-2.87	20.6	110	9
Cierre de la válv 3/4	0,07	9.54	0.33	-2.75	20.8	100	10
Cierre Válv ¾	0,07	9.73	1,00	-2.50	20.8	90	10
Cierre val ¾	0,07	9.73	1.33	-2.37	20.6	80	10
Cierre vál ¾	0,07	9.16	2.00	0.12	22.7	70	10

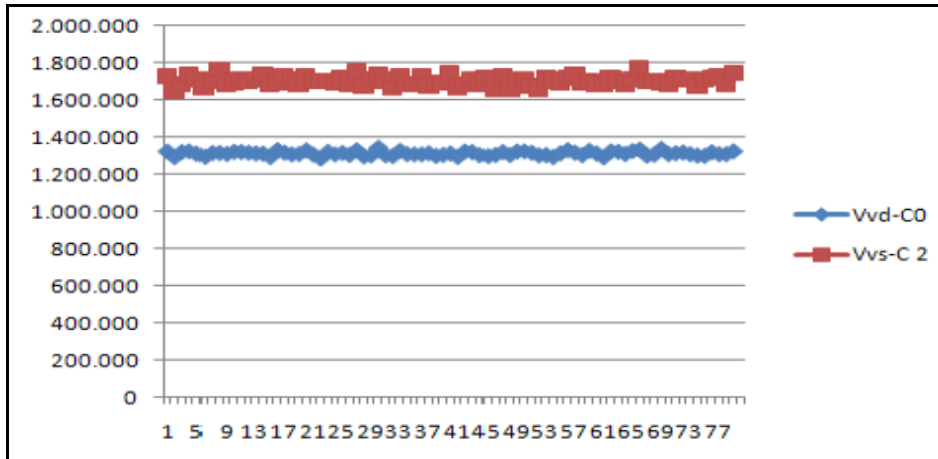
Fuente: REYES DE LA CRUZ, Jorge Luis; RUIZ CHAVARRÍA, Gerardo y HERNÁNDEZ ZAPATA, Sergio. Apuntes de máquinas hidráulicas. p. 920.

Tabla II. **Valores de los parámetros fundamentales del cálculo hidráulico**

Parámetros de cálculo en la instalación	Resultados	Unidad
Altura neta positiva en la aspiración requerida; $[NPSH_R]$	5,29	m
Altura neta positiva en la aspiración disponible; $[NPSH_A]$	1,09	m

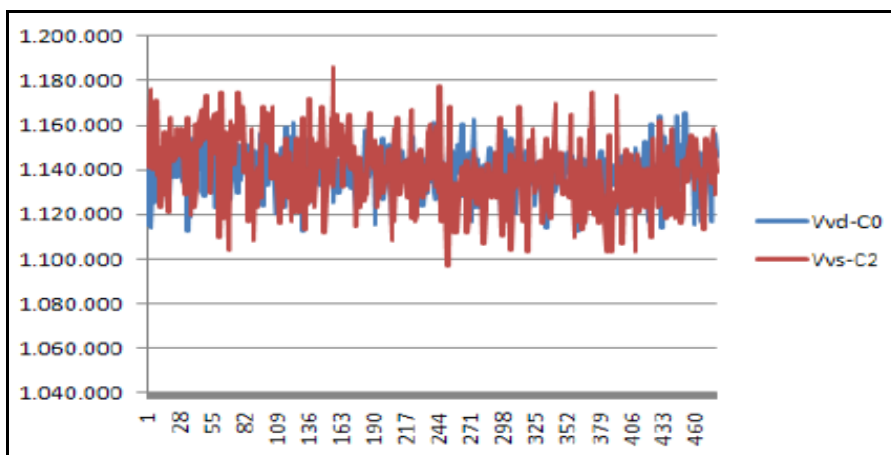
Fuente: REYES DE LA CRUZ, Jorge Luis; RUIZ CHAVARRÍA, Gerardo y HERNÁNDEZ ZAPATA. Sergio. Apuntes de máquinas hidráulicas. p. 920.

Figura 4. **Comportamiento de la presión sin cavitando en función del tiempo**



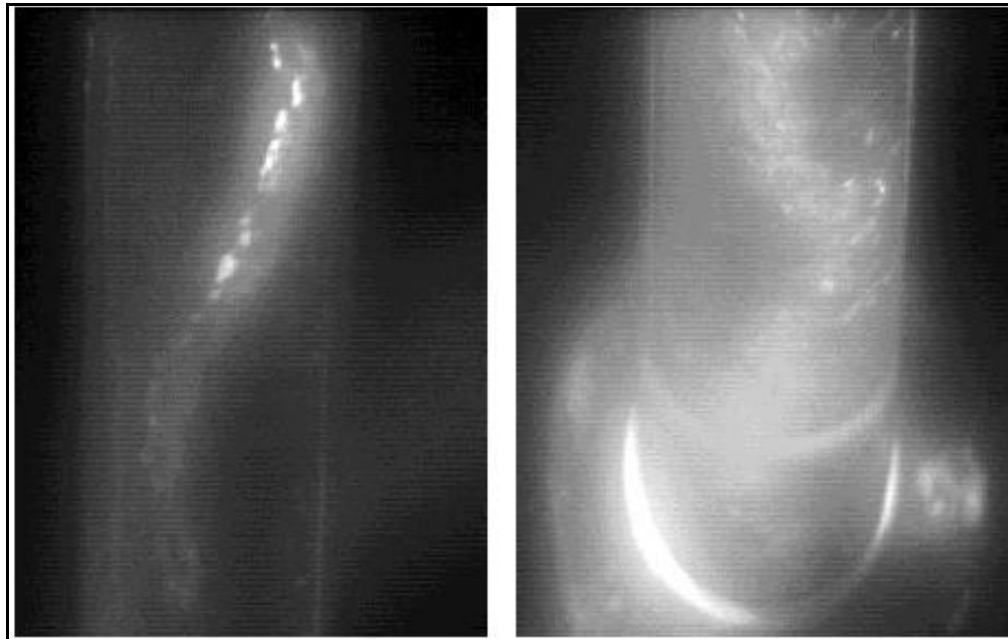
Fuente: REYES DE LA CRUZ, Jorge Luis; RUIZ CHAVARRÍA, Gerardo y HERNÁNDEZ ZAPATA. Sergio. Apuntes de máquinas hidráulicas. p. 921.

Figura 5. **Comportamiento de la presión cavitando en función del tiempo**



Fuente: REYES DE LA CRUZ, Jorge Luis; RUIZ CHAVARRÍA, Gerardo y HERNÁNDEZ ZAPATA. Sergio. Apuntes de máquinas hidráulicas. p. 923.

Figura 6. Imagen del fluido en la tubería de descarga y el oscilador que forman las burbujas durante la cavitación y el cambio de las burbujas al variar el caudal



Fuente: REYES DE LA CRUZ, Jorge Luis; RUIZ CHAVARRÍA, Gerardo y HERNÁNDEZ ZAPATA. Sergio. Apuntes de máquinas hidráulicas. p. 923.

Se observó la cavitación por la regulación del gasto a la entrada de la tubería de succión y con el aumento de la temperatura. Se observó con claridad las turbulencia que se generan en la tubería de succión durante la regulación y algunas imágenes de la evolución de las burbujas dentro de las tuberías, el oscilador de burbujas en la tubería de descarga que escapan de la bomba cuando se producía la cavitación, así como la instalación al someterse a regulación del flujo mediante la válvula de succión no cumple con la condición de ausencia de cavitación provocando fluctuaciones en el fluido, tuberías y en la estructura de la instalación (vibraciones).

La captura de datos se realizó mediante la lectura directa de los instrumentos de medición usados como en el caso del caudalímetro en el registro del caudal y la temperatura registrada en el milímetro con el termopar

Se analizaron el comportamiento de las curvas obtenidas a través de los datos registrados y procesado por LABVIEW y el programa computacional SCILAB-5.1.1, mostrando con precisión los valores de la caída de presión durante la ocurrencia de la cavitación, vista en simulaciones realizadas anteriormente cuyos resultados obtenidos concuerdan con la teoría acerca del funcionamiento de las bombas centrífugas. El aumento de la turbulencia en la tubería de succión y permanencia del oscilador en la tubería de impulsión durante la regulación, son muestra que la instalación experimental trabaja en régimen cavitacional.

Se pudo registrar el comportamiento de las variaciones de presión en los diferentes puntos del circuito, quedando enmarcado los valores a los cuales ocurre la caída de presión en la salida del impulsor producto de la ocurrencia de la cavitación.

La teoría expuesta en pláticas y seminarios impartidos con el objetivo de la exposición de los conocimientos acerca del funcionamiento de las bombas centrífugas y la cavitación es totalmente aplicable a la instalación experimental con un acercamiento al funcionamiento en la práctica de instalaciones hidráulicas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Recurso didáctico

Medio material o conceptual que se utiliza como apoyo en la enseñanza presencial, con la finalidad de facilitar o estimular el aprendizaje.

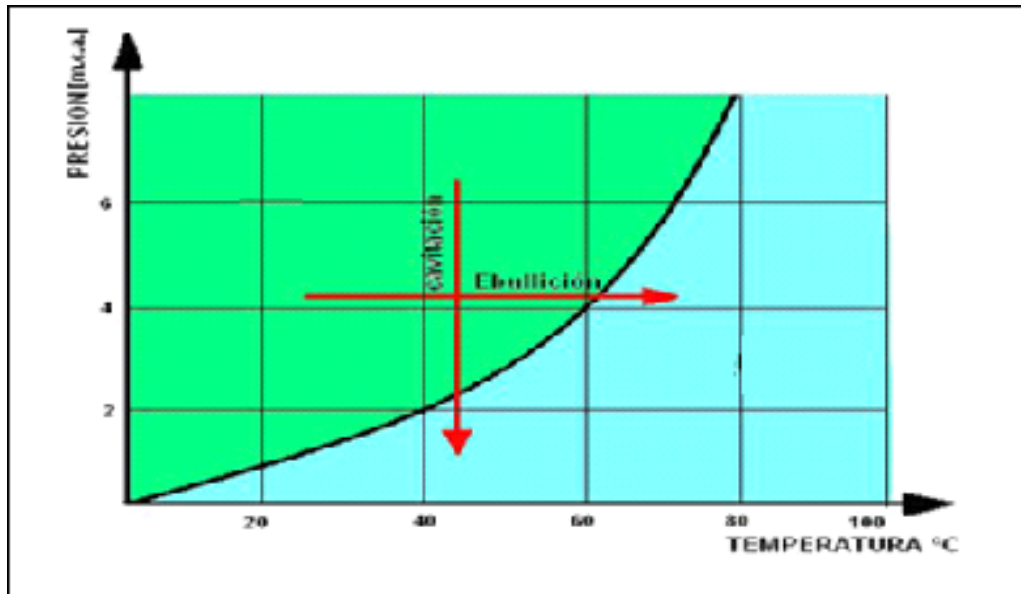
Características del recurso didáctico

- Es un instrumento
- Incide en la transmisión educativa
- Se concibe en relación con el aprendizaje
- Afecta a la comunicación educativa

2.2. Cavitación

Formación de cavidades (burbujas) de vapor y gas, localizadas en el interior y en las proximidades de la superficie de una corriente fluida en rápido movimiento. La figura 7 muestra la condición física fundamental para la aparición de la cavitación, en la cual la presión en el punto de formación de las cavidades desciende hasta la presión de vapor del fluido.

Figura 7. Representación física para la aparición de cavitación



Fuente: MARCHEGANI, Ariel. Cavitación. p. 2.

Por otra parte con una incidencia menor, pero coadyuvando en el fenómeno, cuando el líquido alcanza una presión reducida desprende parte de los gases que tiene disueltos, según la Ley de Henry, la cantidad de gas disuelto en un líquido es directamente proporcional a esta, la solubilidad es función de la temperatura, descendiendo al incrementar esta. El gas que normalmente tienen disuelto en su seno los líquidos es el aire, con una mayor riqueza relativa de oxígeno que de nitrógeno, debido a su mayor solubilidad.

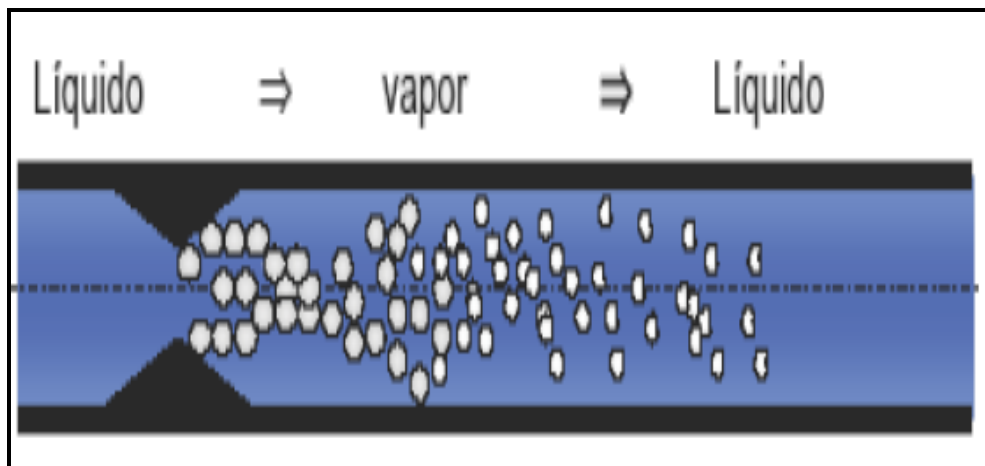
La cantidad de aire que contiene el agua en condiciones normales es del orden del 2 al 3 % en volumen, es decir que el aire disuelto en un litro de agua ocupará al desprenderse de ella un volumen de 20 a 30 centímetros cúbicos.

Esto no quiere decir que la disolución ocupe tal capacidad, puesto que los volúmenes en una disolución gas - líquido o gas - gas no son aditivos. Parte del aire disuelto se desprende cuando la presión del líquido alcanza valores próximos a la de presión de vapor, de tal manera que se forman bolsas de aire y de vapor del líquido.

2.2.1. Etapas de la cavitación

La cavitación se divide en el proceso de formación de burbujas y la implosión de las mismas. La figura 8 muestra que la primera etapa se encuentra formada por la transición de la fase líquida a vapor. La segunda etapa comprende la transición de la fase vapor a líquida.

Figura 8. Etapas del fenómeno de cavitación

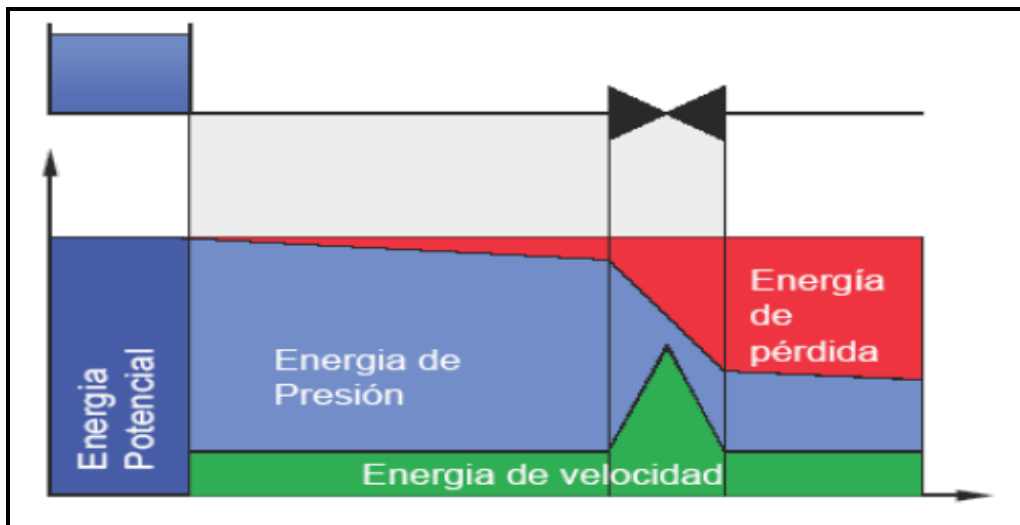


Fuente: MARCHEGANI, Ariel. Cavitación. p. 3.

2.2.2. Descenso de la presión de vapor como efecto de un estrangulamiento

La presión de un fluido en movimiento en una tubería por presión de una bomba o de una diferencia de altura es mayor que la presión de vapor de éste, por lo que es necesario analizar el balance energético de la corriente que fluye en una tubería horizontal previo al almacenamiento tanque donde la energía se almacena como potencial para posteriormente transformarse en energía de velocidad, presión y de pérdida, como lo muestra la figura 9.

Figura 9. **Balance energético**

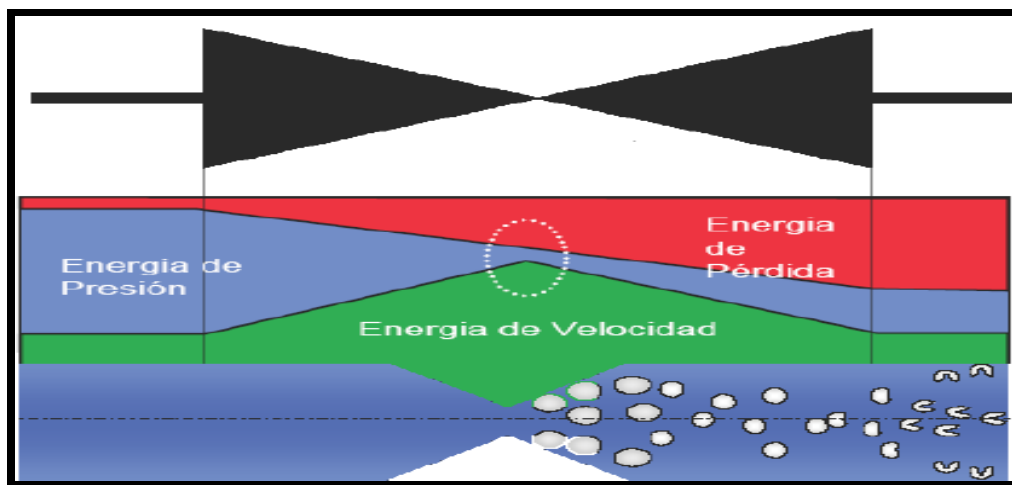


Fuente: MARCHEGANI, Ariel. Cavitación. p. 4.

Según se observa en la figura 9 y 10 la reducción del área de paso en el punto de la válvula reguladora, el caudal y la porción asociada a la energía de velocidad y pérdida aumenta bruscamente.

En forma paralela la energía de presión disminuye manteniendo la energía total del sistema constante y provocando un descenso en la presión de vapor formándose burbujas que se deforman con el aumento de presión y finalmente implotan (condensación instantánea).

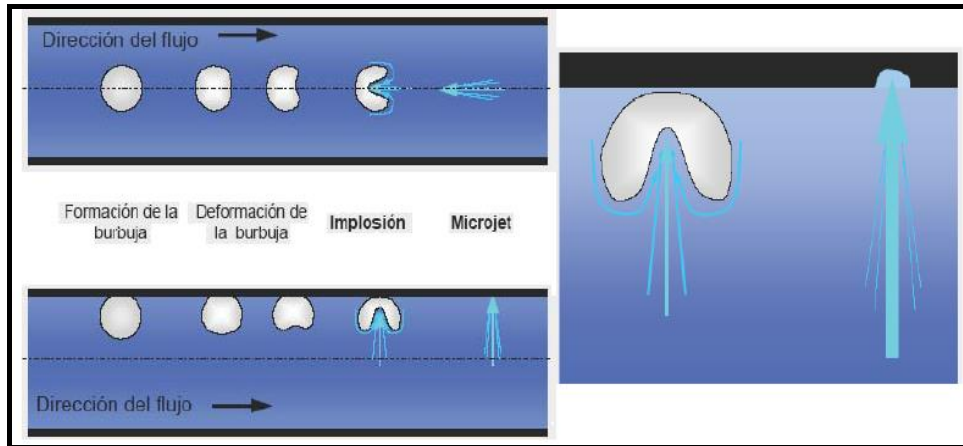
Figura 10. **Balance energético y etapas de la cavitación**



Fuente: MARCHEGANI, Ariel. Cavitación. p. 4.

La figura 11 muestra el desarrollo de una cavidad donde se evidencia que el colapso es de forma concéntrica provocando la formación de un micro-jet que choca con la superficie sólida transmitiendo un impulso de presión que causa la erosión de la superficie sólida.

Figura 11. **Desarrollo del colapso de una burbuja**

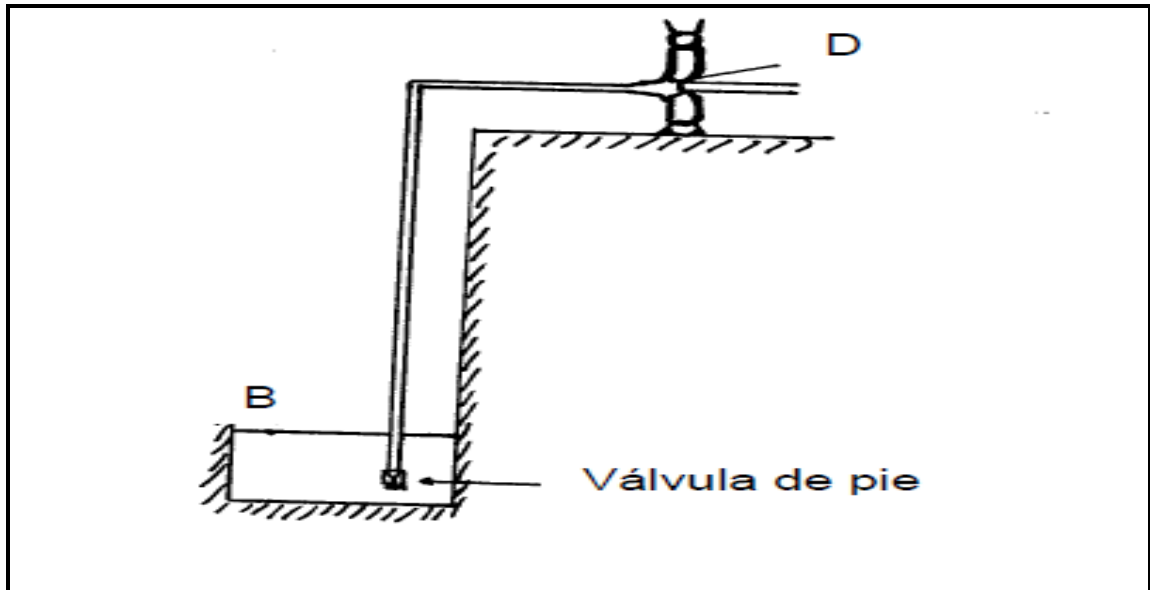


Fuente: MARCHEGANI, Ariel. Cavitación. p. 8.

2.3. Evaluación de la cavitación en bombas

En una instalación de bombeo, normalmente la presión disminuye hacia aguas abajo, siendo mínima a la entrada de la bomba, lógicamente en un punto cercano a la proa de los álabes, donde todavía el líquido no haya recibido energía del rodete. Realizando un balance energético entre la lámina superior del depósito de aspiración (B) y el mencionado punto cercano a la proa de los álabes (D) se tendrá (figura 12).

Figura 12. Esquema de la instalación de bombeo



Fuente: ALMANDOZ, Berrondo; MONGELOS OQUIÑENA, Jabier; PELLEJERO SALABERRIA, M^a Belén. Apuntes de máquinas hidráulicas. p. 281.

(Ecuación 1)

$$\frac{P_B}{\gamma_1} + Z_B + \frac{V_B^2}{2g} - hf_{BD} = \frac{P_D}{\gamma_1} + Z_D + \frac{V_D^2}{2g}$$

Donde:

hf_{BD} = pérdida de carga de B-D (m.c.a)

Z = altura (m)

P = presión absoluta (m.c.a)

Teniendo en cuenta que VB es nula y restando la tensión de vapor (Pv absoluta) a los dos miembros y ordenando los factores, se tiene:

(Ecuación 2)

$$\frac{P_D}{\gamma_1} - \frac{P_S}{\gamma_1} + \frac{V_D^2}{2g} = \frac{P_B}{\gamma_1} - \frac{P_S}{\gamma_1} - (Z_D - Z_B + h_{f_{BD}})$$

Donde el primer miembro es la energía que tiene el líquido en el punto D por encima de la presión de vapor, es decir lo que se denomina carga neta de la aspiración sobre la tensión de vapor (CNA), o lo que es lo mismo, en palabras inglesas Net Positive Suction Head over vapor pressure. Las siglas de las cuatro primeras palabras de dicha frase –NPSH- corresponden a algo que ha alcanzado fortuna, de tal manera que la carga neta de la aspiración se conoce internacionalmente con el nombre de NPSH, realmente se le conoce con el nombre de NPSH disponible, debido que es la carga neta en la aspiración que dispone el líquido en el punto mencionado.

En la ecuación 2, el primer miembro se encuentra igualado a todos los términos que son dependientes de la instalación, por lo que se puede afirmar que el NPSH disponible es función exclusiva de ésta. Para que no se produzca cavitación es necesario y suficiente que PD > PV, es decir que PD-PV >0; así también se puede expresar como:

$$\text{NPSH disponible} > \frac{V_D^2}{2g}$$

Debido que al segundo miembro de la igualdad se le denomina NPSH requerido, ya que se trata de la energía mínima que se requiere tenga el líquido en la aspiración para que no se produzca cavitación, el cual al ser reemplazado en la ecuación 2 y ordenada se obtiene:

(Ecuación 3)

$$\text{NPSH}_{\text{disponible}} = \text{NPSH}_{\text{requerido}} + \frac{P_D - P_S}{\gamma_1}$$

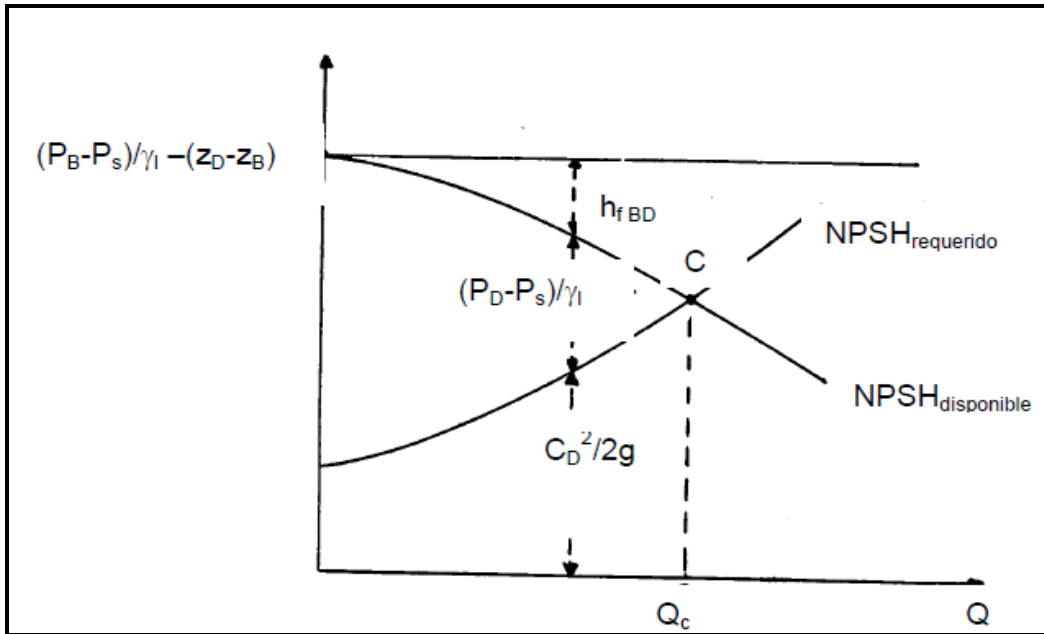
El valor del tercer término de la ecuación 3, representa en cuanto se aleja el sistema de la cavitación, por lo que recibe el nombre de carga de seguridad o NPSH de seguridad. Este factor depende del técnico diseñador de la instalación y del seleccionador de la bomba, que a la vista del NPSH disponible de la instalación elegirá una bomba con un NPSH determinado. Se aconseja que no descienda en ningún momento de 0,5 a 0,90 m.c.a. o bien que NPSH disponible sea mayor a 1,3 NPSH requerido.

En la figura 13 se dibujó un eje coordenado, donde en las abscisas se representa el caudal, y en ordenadas el valor de:

$$\frac{P_B - P_S}{\gamma_1} - (Z_D - Z_B)$$

La cual es una horizontal al ser independiente del caudal; y en segundo lugar se ha dibujado el NPSH disponible al restarle al valor anterior la pérdida de carga en la aspiración.

Figura 13. Representación de los valores NPSH en función del caudal



Fuente: ALMANDOZ, Berrondo; MONGELOS OQUIÑENA, Jabier; PELLEJERO SALABERRIA, M^a Belén. Apuntes de máquinas hidráulicas. p. 283.

Por otra parte se ha dibujado el NPSH requerido que es igualmente función del caudal. La diferencia de ordenadas entre ambas curvas resulta ser la carga de seguridad, que se reduce al incrementarse el caudal, hasta el punto C , denominado punto crítico, donde aquella se anula produciéndose en él la cavitación teórica.

2.4. Altura manométrica de la bomba

Energía útil que la bomba le comunica al líquido, es decir, diferencia de energías totales que tiene el líquido entre la entrada y salida de la bomba. La ecuación 5 muestra el balance energético general, para el cual se deberá realizar las simplificaciones necesarias dependiendo de la instalación.

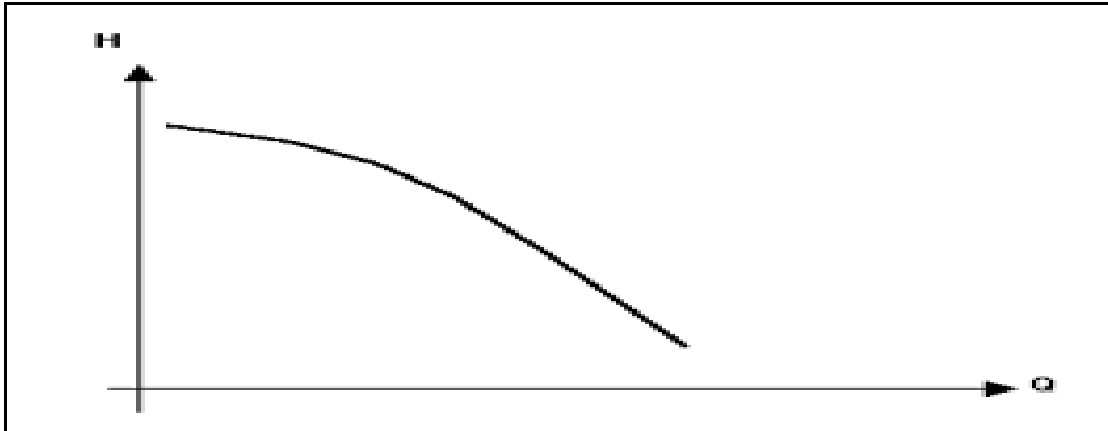
(Ecuación 4)

$$H_{(m)} = B_s - B_e = \left[\frac{V_s^2}{2g} + \frac{P_s}{\gamma} + z_s \right] - \left[\frac{V_e^2}{2g} + \frac{P_e}{\gamma} + z_e \right]$$

La altura de elevación total de la bomba es el incremento de energía adquirido por 1 kilogramo de líquido entre la sección de entrada y de salida de la bomba misma; generalmente se indica con H y se mide en Joule/kilogramo o en metros de líquido transportado (m.c.a.), es decir que determinada bomba da un caudal de 3 metro cúbico/hora con una altura de elevación manométrica de 12 metros columna de agua, significa que esta bomba logra elevar una cantidad equivalente a 3 metros cúbico/hora hasta una altura máxima de 12 metros.

Todas las bombas disponen de una placa donde se indica el caudal, la altura de elevación y su interconexión, los cuales varían de forma inversa. Si varios puntos de funcionamiento de una bomba son reportados en un diagrama cartesiano, donde en el eje de las abscisas se coloca el caudal y en el eje de las ordenadas la altura de elevación se obtiene la llamada característica de la bomba como lo indica la figura 13.

Figura 14. **Curva característica de una bomba centrífuga**



Fuente: ALMANDOZ; Berrondo; MONGELOS OQUIÑENA, Jabier; PELLEJERO SALABERRIA, M^a Belén. Apuntes de máquinas hidráulicas. p. 283.

2.5. **Altura manométrica de la instalación**

Energía necesaria de la instalación para trasegar un determinado caudal de líquido desde el depósito superior al inferior. Es decir, diferencia de energías entre ambos depósitos más la pérdida de carga en la tubería de aspiración e impulsión. La expresión analítica que define la altura manométrica de la instalación se presenta en la ecuación 5.

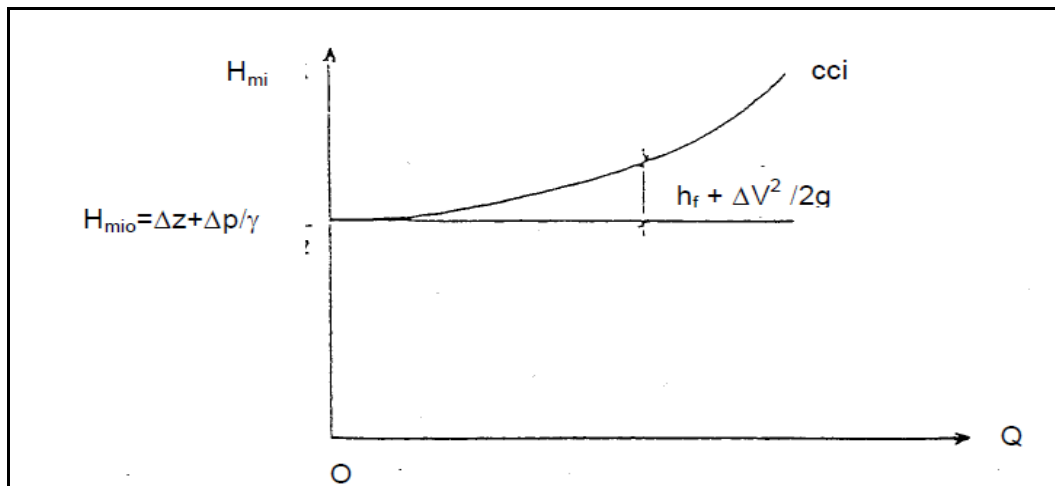
(Ecuación 5)

$$H_{mi} = \left[z_2 + p_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right] - \left[z_1 + p_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right] + h_{f_{1-2}}$$

$$H_{mi} = \Delta z + \Delta p + \Delta \frac{v^2}{2g} + h_{f_{1-2}}$$

Los dos primeros términos del segundo miembro son independientes del caudal, siendo por tanto su suma el valor de la altura manométrica de la instalación a caudal nulo (H_{i0}), siendo dicho valor altura piezométrica de la instalación. La representación gráfica de la expresión anterior se denomina curva característica de la instalación (cci), la cual se indicada en la figura 15.

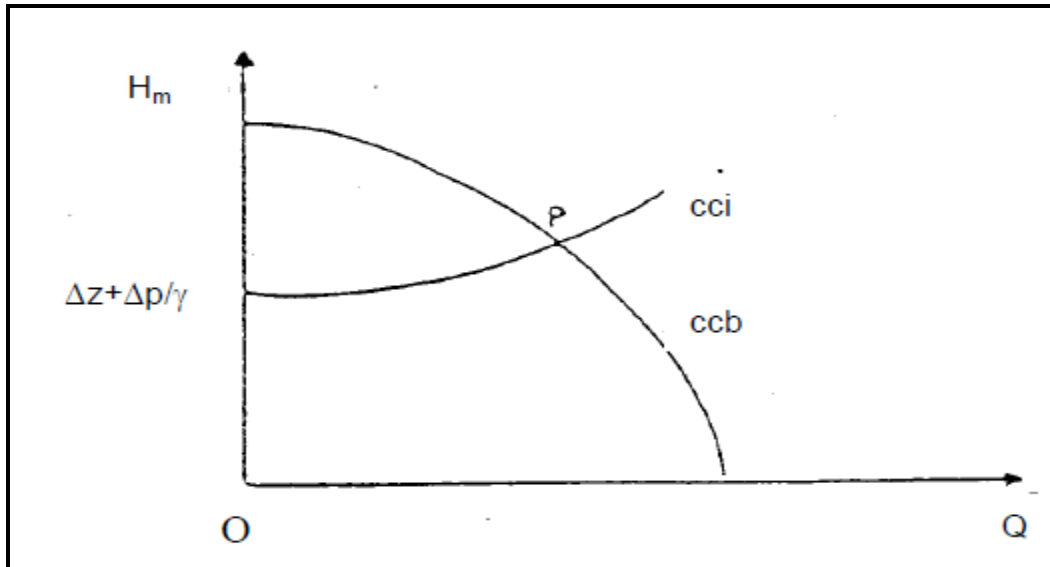
Figura 15. **Curva característica de la instalación**



Fuente: BERRONDO, Almandoz; MONGELOS OQUIÑENA, Jabier; PELLEJERO SALABERRIA, M^a Belén. Apuntes de máquinas hidráulicas. p. 227.

Si en un mismo gráfico se representan las curvas características de la instalación y de la bomba, en el punto de intersección de ambas se tiene el punto, según se muestra en la figura 16.

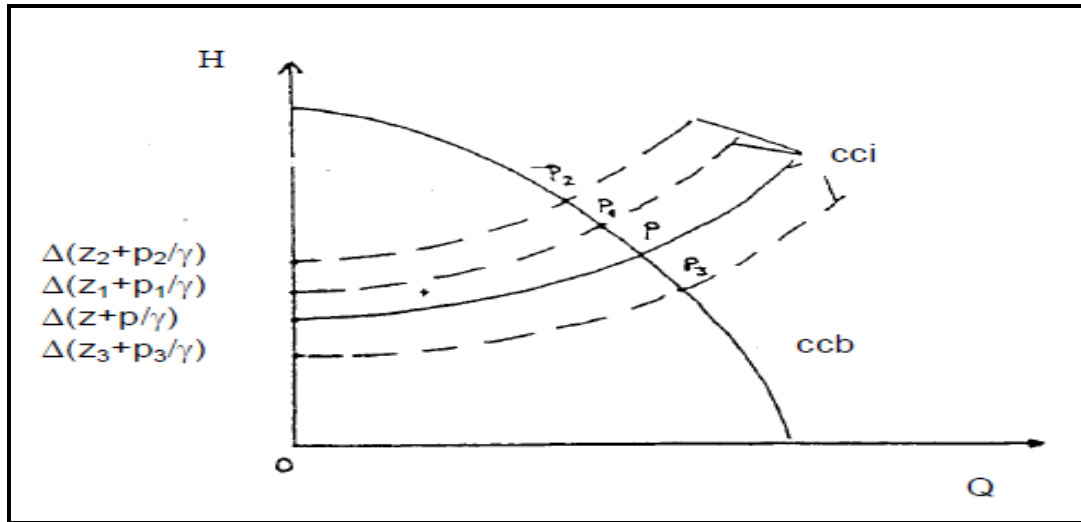
Figura 16. **Curva característica de la instalación y de la bomba**



Fuente: BERRONDO, Almandoz; MONGELOS OQUIÑENA, Jabier; PELLEJERO SALABERRIA, M^a Belén. Apuntes de máquinas hidráulicas. p. 228.

Si en una determinada instalación variara la diferencia de cotas o la diferencia de presiones entre los depósitos superior e inferior, quedando el resto invariable, la curva característica de la instalación se desplazará paralelamente a sí misma, como indica la figura 17, modificándose el punto de funcionamiento al trabajar con la misma bomba.

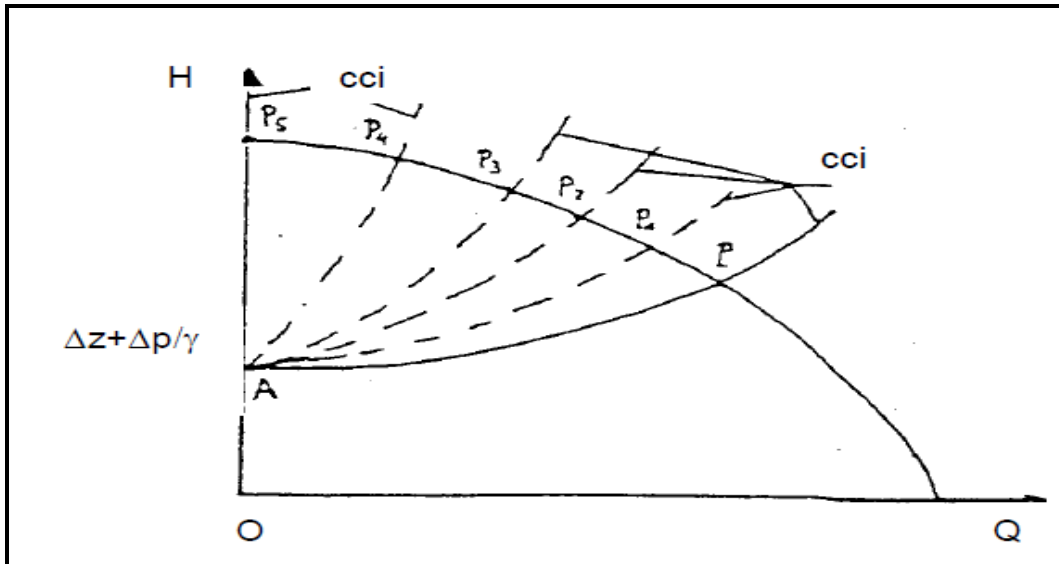
Figura 17. **Curva característica de la instalación al modificarse la diferencias de presiones o alturas**



Fuente: BERRONDO, Almandoz; MONGELOS OQUIÑENA, Jabier; PELLEJERO SALABERRIA, M^a Belén. Apuntes de máquinas hidráulicas. p. 228.

Si se cierra poco a poco una válvula situada en la instalación, dejando el resto igual, aumentarán las pérdidas de carga y su curva característica se cerrará en abanico tal y como se muestra en la figura 18.

Figura 18. **Curva característica de la instalación al variar la pérdida de carga**



Fuente: BERRONDO, Almandoz; MONGELOS OQUIÑENA, Jabier; PELLEJERO SALABERRIA, M^a Belén. Apuntes de máquinas hidráulicas. p. 229.

2.6. Cavitación en la admisión de la bomba

Las burbujas se forman en el centro del impulsor, la zona de más baja presión, y se desplazan hasta su implosión o colapso. Este tipo de cavitación la causa una altura de aspiración excesiva o bien, que el NPSHD de la instalación sea insuficiente, debido al aumento de la pérdida de carga en la succión de la bomba (obstrucciones parciales). La bomba no provoca ambas situaciones sino su entorno (instalación / aplicación).

2.7. Cavitación en la descarga de la bomba

Se produce cuando el punto de descarga se encuentra muy alto. La cavitación se localiza entre el extremo del álabe del rodete y donde acaba la envolvente del cuerpo. Al paso de los álabes, se forman y colapsan las burbujas, de manera continua. En ese momento, se crea una presión suficiente que hace posible la implosión de la burbuja en el extremo del álabe. En la parte posterior del mismo, ya se ha formado una nueva burbuja que se sitúa ahí hasta que implosiona en el siguiente álabe (fenómeno similar al que ocurre en un venturi).

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Las variables en función de los factores del equipo y perturbadores se encuentran definidas de acuerdo al equipo diseñado.

Tabla III. Definición operacional de variables

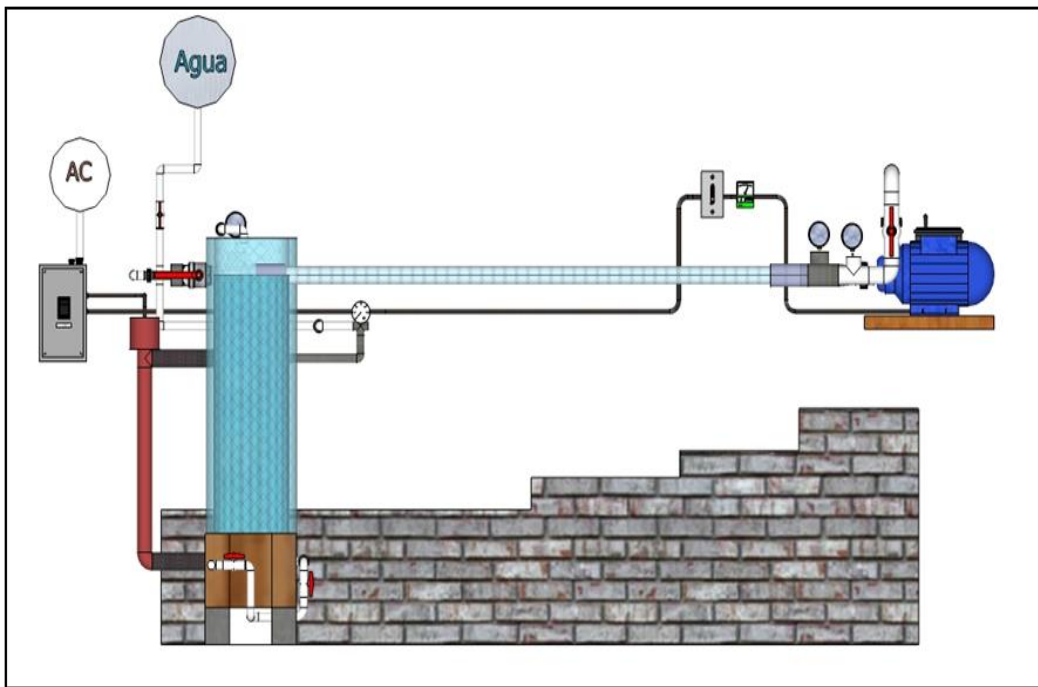
No.	Variable	Unidad	Factor potencia de diseño		Factores perturbadores	
			Constante	Variables	Controlable	Ruido
Análisis del Equipo						
Primarias						
1	Presión del vapor del agua	m.c.a.		X		
2	Presión de entrada (Vacío)	m.c.a.				
3	Presión de salida	m.c.a.		X		
4	Flujo másico del agua	l/min		X		
5	Temperatura del fluido	°C		X		
Secundarias						
6	Cabeza neta de succión requerida	m.c.a.		X		
7	Cabeza neta de succión disponible	m.c.a.		X		
Auxiliares						
9	Diámetro nominal de tubería y accesorios	m	X			
10	Longitud de la tubería	m	X			
Análisis de ambiente externo						
12	Temperatura Ambiente	°C				X
12	Presión Atmosférica local	m.c.a.				X

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

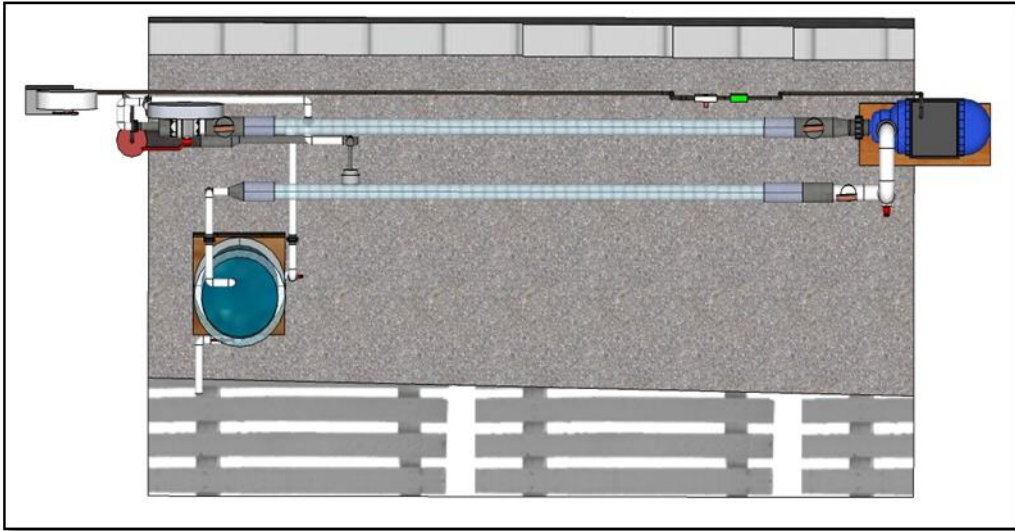
El campo de estudio se delimitó por el sistema que define el equipo con fines didácticos, instalado en el Laboratorio de Ingeniería Química.

Figura 19. Vista frontal del equipo instalado en el Laboratorio de Ingeniería Química



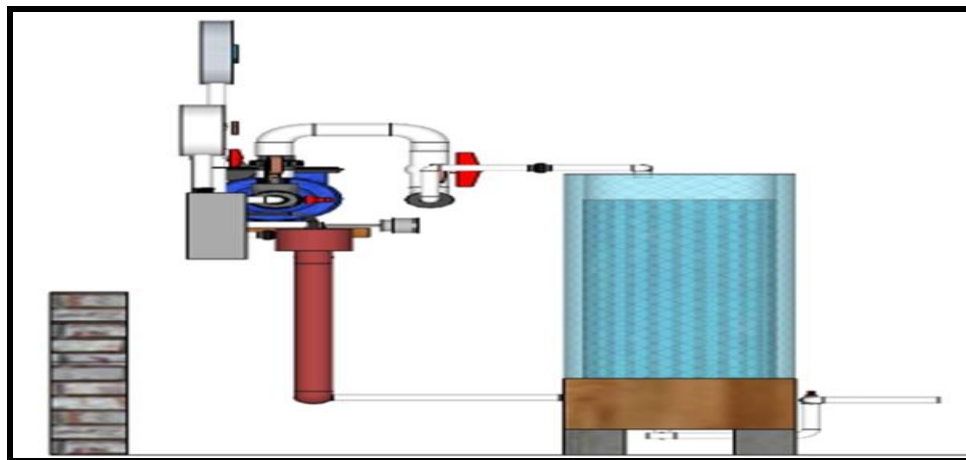
Fuente: elaboración propia, con programa Google Sketchup.

Figura 20. **Planta del equipo instalado en el Laboratorio de Ingeniería Química**



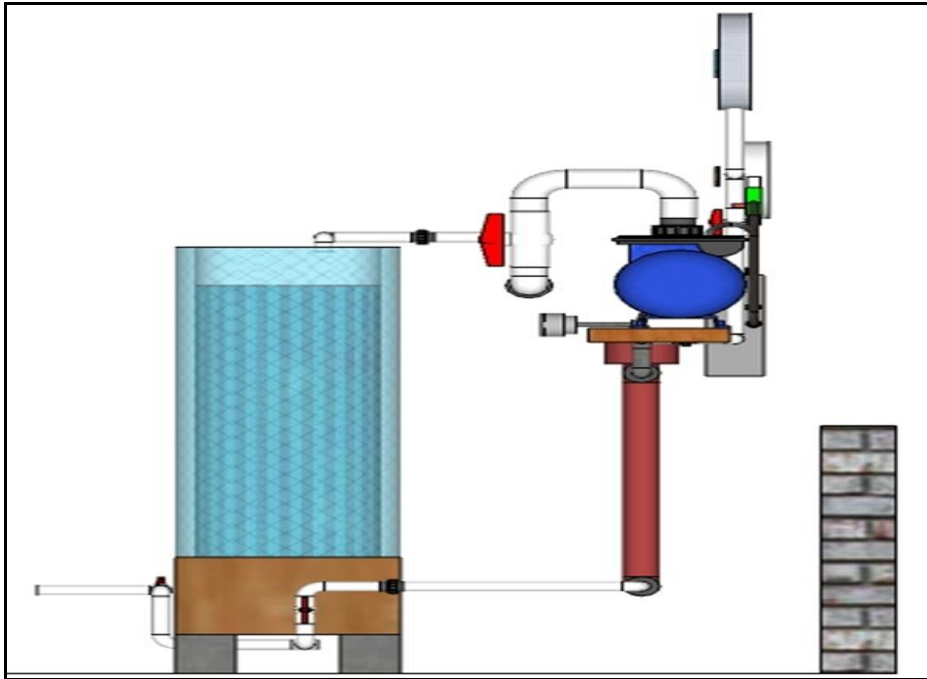
Fuente: elaboración propia, con programa Google Sketchup.

Figura 21. **Perfil izquierdo del equipo instalado en el Laboratorio de Ingeniería Química**



Fuente: elaboración propia, con programa Google Sketchup.

Figura 22. **Perfil derecho del equipo instalado en el Laboratorio de Ingeniería Química**



Fuente: elaboración propia, con programa Google Sketchup.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Leda Marysol Gómez Montenegro
- Asesor: José Manuel Tay Oroxom
- Estudiantes: estudiantes del curso de Laboratorio de Ingeniería Química 1, código 428.

3.4. Recursos materiales

En la siguiente tabla se muestran los materiales que fueron necesarios para utilizar en el estudio de la cavitación.

Tabla IV. Recursos materiales utilizados

Descripción	Material	Diámetro nominal (pulgada)	Unidades
Manovacuómetro	HG	¼	2
Termómetro	HG	¼	1
Bomba centrífuga	HG	1X1	1
Codo 90°	PVC	½	16
	PVC	1	3
	HG	1	2
Tees	PVC	½	1
	HG	½	1
		1	1
		1 ¼	2
Expansión	HG	½ - 1	1
		½ - 1 ¼	1
		1 - 1 ¼	2
	PVC	1 - 1 ¼	1
Reducción	HG	½ - ¼	1
		1 - ½	2
		1 ¼ - ¼	2
		1 ¼ - 1	3
		1 ¼ - ½	1
		1 ¼ - 1	3
		1 ¼ - ½	1

Continuación de la tabla IV.

Válvula de bola	HG	1 ¼	1
	PVC	½	2
Tubería de pírex	-----	1	2,40 m
Tubería de PVC	-----	½	0,90 m
Amperímetro	-----	-----	1
Área de instalación de equipo	-----	-----	4 m ²
Calentador de paso	-----	-----	
Agua	-----	-----	
Energía eléctrica	-----	-----	

Fuente: elaboración propia.

3.5. Técnica utilizada

El estudio fue de tipo experimental estuvo formado por un equipo en el que se estudiaron las variables involucradas y se obtuvieron datos numéricos para la generación de modelos matemáticos y tendencias gráficas.

En la operación directa del equipo por parte de los estudiantes se estableció el recurso didáctico que fue evaluado a través de los informes técnicos realizados por los participantes. Su finalidad fue relacionar las variables involucradas en el proceso del fenómeno de cavitación, permitiendo obtener muestreos de datos a partir de aleatoriedad con cada práctica realizada con el equipo.

3.6. Cualitativa

Se realizaron interpretaciones de los resultados reportados por los estudiantes para evaluar los aspectos de la metodología didáctica y el grado de apropiación del conocimiento adquirido.

3.7. Cuantitativa

Los estudiantes realizaron tratamientos y repeticiones basados en la metodología del diseño experimental, que permitió obtener series de datos que incorporados a relaciones y modelos matemáticos generaron resultados cuantitativos, susceptibles de análisis, interpretación y generalización.

3.8. Recolección y ordenamiento de la información

La tabulación de las variables de masa, tiempo, presión de succión y presión de descarga, para cada temperatura de operación del sistema. Fue necesario definir el número de tratamientos y repeticiones a realizar a partir de la siguiente expresión:

$$N = \frac{Z_{\alpha/2} PQ}{E^2} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

N = número de tratamientos y repeticiones

$Z_{\alpha/2}$ = confiabilidad

P = probabilidad de éxito

Q = probabilidad de fracaso

E = error estimado

Sustituyendo datos de la ecuación 6 con los datos antes mencionados se obtiene lo siguiente:

$$N = \frac{(1,96)^2 * 0,95 * 0,05}{0,20^2}$$

$$N = 4,5619 \approx 5$$

Son necesarios 5 tratamientos y cinco repeticiones en el experimento.

Tabla V. **Representación de la tabulación de tratamientos y repeticiones**

Tratamiento	Repeticón
X_n	Y_{m+i}
X_{n+1}	Y_{m+1}
X_{n+2}	Y_{m+2}
X_{n+i}	Y_{m+i}

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Representación de la tabulación de variables experimentales**

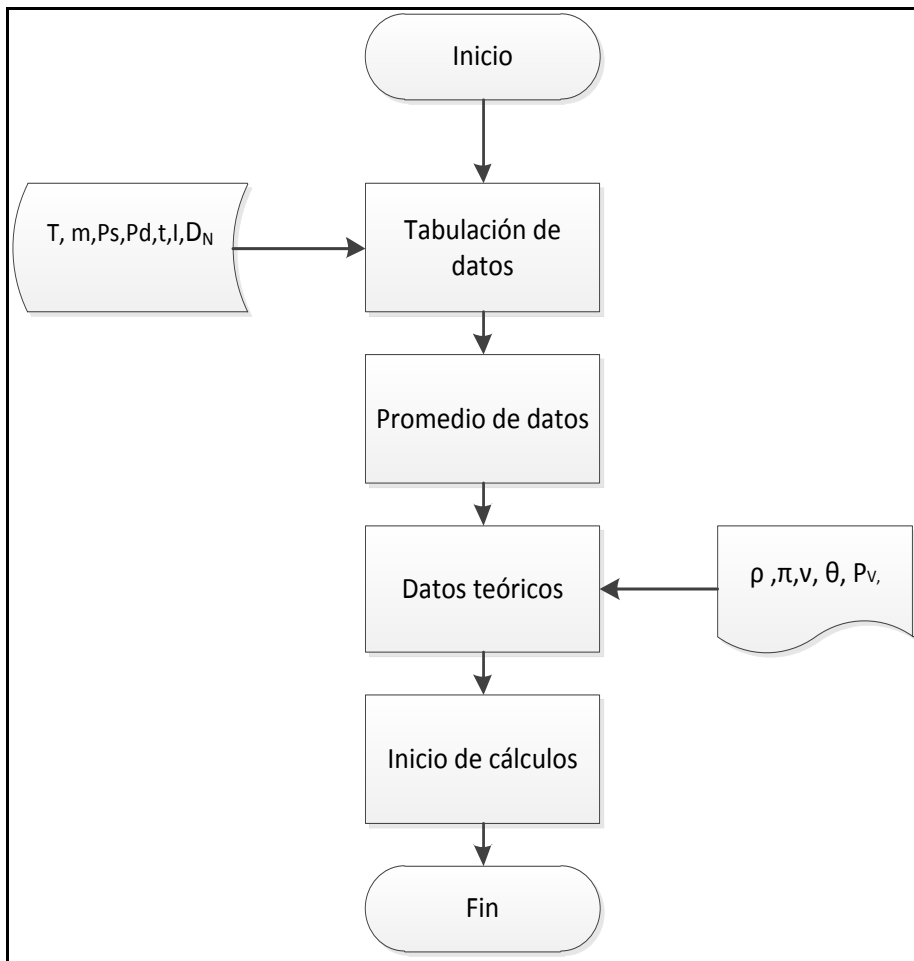
Temperatura (°C)	$T_{Xn,m}$	Ps (plg Hg)	$PS_{Xn,m}$	Pd (PSI)	$Pd_{Xn,m}$
	$T_{Xn+1,Ym+1}$		$PS_{Xn+1,Ym+1}$		$Pd_{Xn+1,Ym+1}$
	$T_{Xn+2,Ym+2}$		$PS_{Xn+2,Ym+2}$		$Pd_{Xn+2,Ym+2}$
	$T_{Xn+i,Ym+i}$		$T_{Xn+i,Ym+i}$		$T_{Xn+i,Ym+i}$
Masa (kg)	$m_{Xn,m}$	Tiempo (s)	$t_{Xn,m}$		
	$m_{Xn+1,Ym+1}$		$t_{Xn+1,Ym+1}$		
	$m_{Xn+2,Ym+2}$		$t_{Xn+2,Ym+2}$		
	$T_{Xn+i,Ym+i}$		$T_{Xn+i,Ym+i}$		

Fuente: elaboración propia.

3.9. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

La tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información se realizó para cada serie de datos de 20, 26 y 40 grados Celsius. La figura 23 muestra la síntesis de la secuencia utilizada.

Figura 23. **Diagramas de la tabulación ordenamiento y procesamiento de la información experimental recolectada**



Fuente: elaboración propia.

3.10. Análisis estadístico

El análisis estadístico utilizado para el análisis de los resultados del estudio, se delimitó en la obtención de la media, incertidumbre absoluta, desviación estándar, varianza de la muestra y nivel de confianza (95,0 %).

3.10.1. Dato promedio

El promedio (\bar{a}), permitió obtener un dato representativo para cada variable en cada medición, de esta forma se tomó en cuenta las posibles variaciones aleatorias junto con la desviación estándar:

(Ecuación 7)

$$\bar{a} = \frac{\sum_i^n a_i}{n} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n}$$

Donde:

\bar{a} : Valor promedio

a_i : Valor i

n : Número de datos

3.10.2. Desviación estándar

La desviación estándar (S_a), permitió cuantificar la dispersión de los valores para una misma medición respecto al valor promedio, lo cual representó el error aleatorio causado por diversos factores:

(Ecuación 8)

$$S_a = \sqrt{\frac{\sum_i^n |\bar{a} - a_i|}{n-1}}$$

Donde:

\bar{a} : Valor promedio

a_i : Valor i

n : Número de datos

S_a : Desviación estándar de la variable a

3.10.3. Incertidumbre absoluta

El error por incertidumbre o error típico permitió determinar la utilidad del resultado final, evaluando la confianza que se puede tener en una decisión basada en el resultado y comparar resultados de mediciones. Para una variable dada:

(Ecuación 9)

$$a_X = f(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)$$

Donde a_n es la n -ésima variable independiente, su incertidumbre está dada por la siguiente ecuación:

(Ecuación 10)

$$\delta a_X = \delta f(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n) = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial(f(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n))}{\partial a_i} \right| \times \delta a_i$$

Donde a_i es la i -ésima y Δa_i es la i -ésima incertidumbre de la n -ésima variable de la función a_X .

Tabla VII. **Análisis estadístico para una temperatura de operación de 20 °C**

NSPHD		NSPHR		Presión entrada	
Media	4,9389	Media	3,3223	Media	1,8552
Incertidumbre absoluta	0,2932	Incertidumbre absoluta	0,4541	Incertidumbre absoluta	0,1655
Desviación estándar	1,5513	Desviación estándar	2,4031	Desviación estándar	0,8755
Varianza de la muestra	2,4067	Varianza de la muestra	5,7749	Varianza de la muestra	0,7666
Nivel de confianza (95,0%)	0,6015	Nivel de confianza (95,0%)	0,9318	Nivel de confianza (95,0%)	0,3395

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Análisis estadístico para una temperatura de operación de 26 °C**

NSPHD		NSPHR		Presión entrada	
Media	4,3313	Media	2,6900	Media	2,0021
Incertidumbre absoluta	0,3313	Incertidumbre absoluta	0,4954	Incertidumbre absoluta	0,1823
Desviación estándar	1,8448	Desviación estándar	2,7582	Desviación estándar	1,0151
Varianza de la muestra	3,4033	Varianza de la muestra	7,6079	Varianza de la muestra	1,0304
Nivel de confianza (95,0%)	0,6767	Nivel de confianza (95,0%)	1,0117	Nivel de confianza (95,0%)	0,3723

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Análisis estadístico para una temperatura de operación de 40 °C**

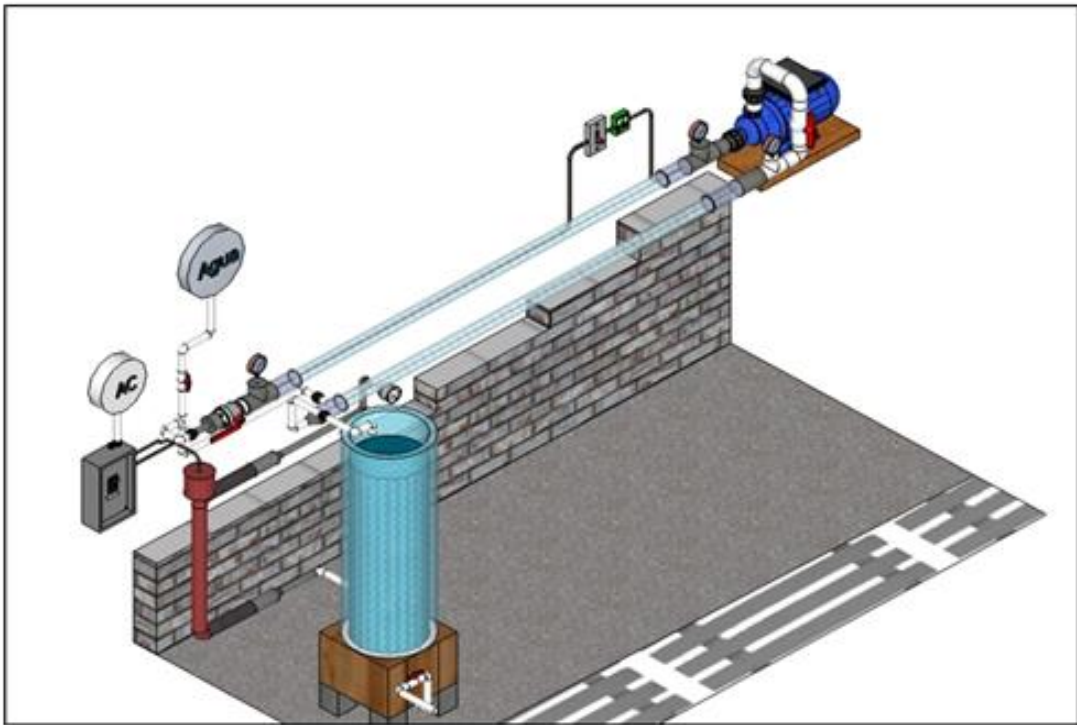
NPSHD		NPSHR		<i>Pe</i>	
Media	4,2364	Media	2,7243	Media	2,2852
Incertidumbre absoluta	0,2300	Incertidubre absoluta	0,3528	Incertidumbre absoluta	0,1360
Mediana	3,8416	Mediana	2,4675	Mediana	2,4216
Varianza de la muestra	2,0636	Varianza de la muestra	4,8553	Varianza de la muestra	0,7210
Nivel de confianza (95,0%)	0,4657	Nivel de confianza (95,0%)	0,7143	Nivel de confianza (95,0%)	0,2752

Fuente: elaboración propia.

4. RESULTADOS

Diseño y construcción de un equipo que integra los componentes materiales requeridos para demostrar en forma física y visual la cavitación.

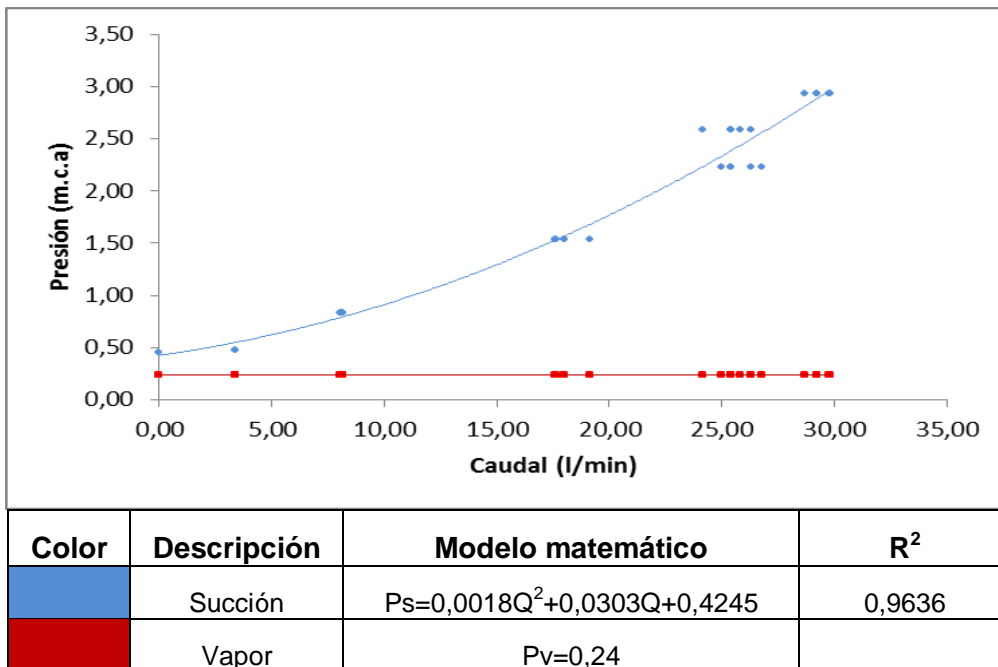
Figura 24. **Diagrama del equipo diseñado e instalado**



Fuente: elaboración propia, con programa Google Sketchup.

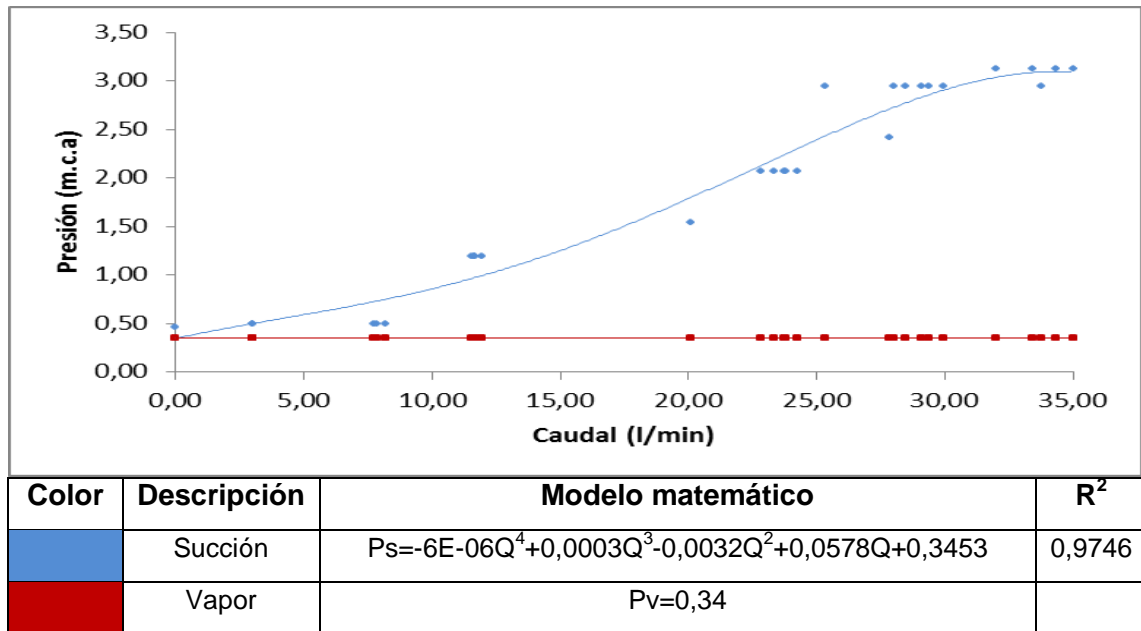
Condiciones de presión, temperatura y caudal en las que se produce el fenómeno de la cavitación.

Figura 25. **Comparación de la presión en la succión de la bomba y la presión de vapor del agua a 20 °C**



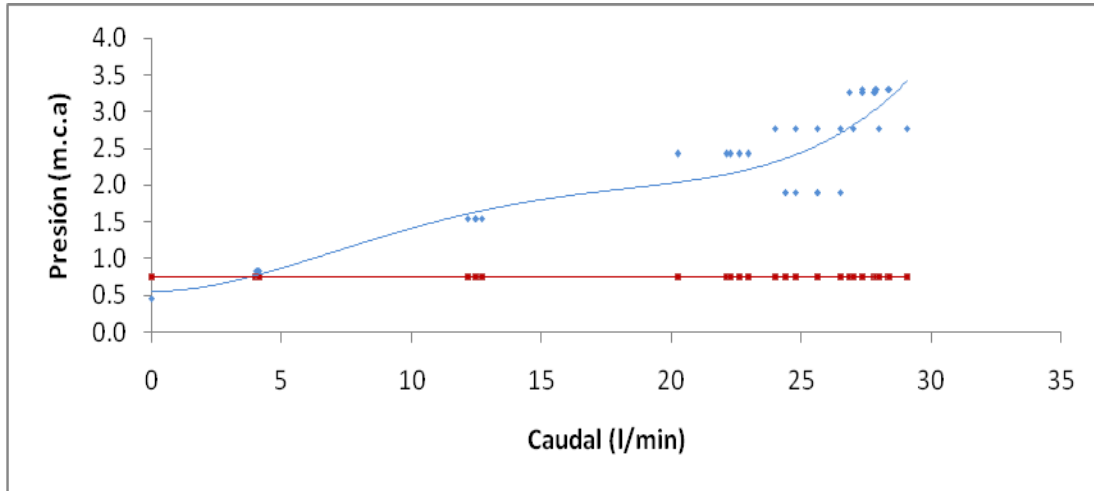
Fuente: elaboración propia.

Figura 26. Comparación de la presión en la succión de la bomba y la presión de vapor del agua a 26 °C



Fuente: elaboración propia.

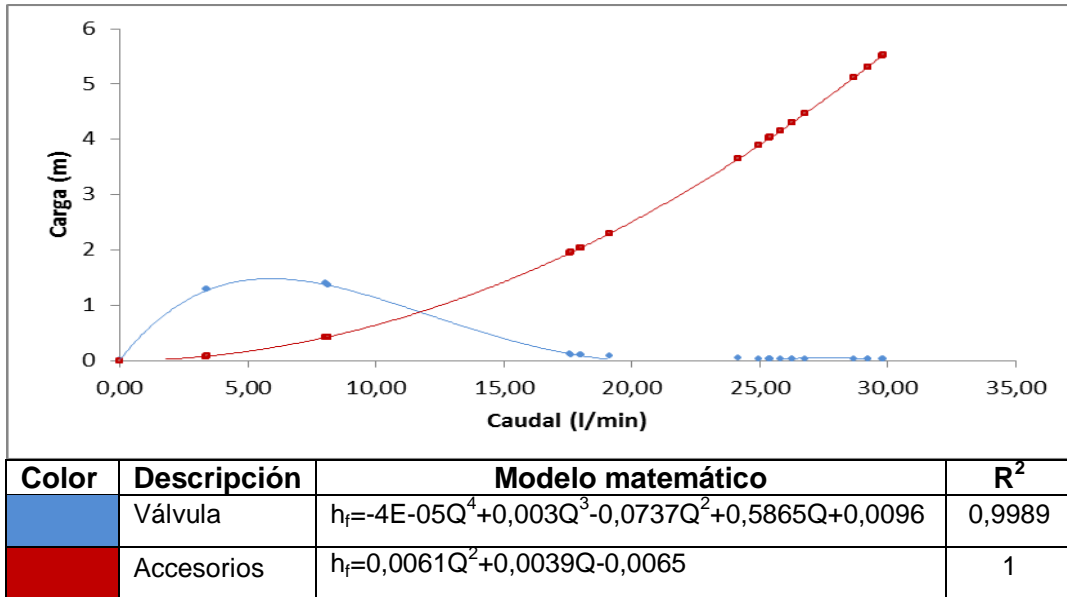
Figura 27. Comparación de la presión en la succión de la bomba y la presión de vapor del agua a 40 °C



Color	Descripción	Modelo matemático	R ²
Azul	Succión	$P_s = 0,00Q^4 - 0,00Q^3 + 0,02Q^2 - 0,00Q + 0,55$	0,82
Rojo	Vapor	$P_v = 0,75$	-----

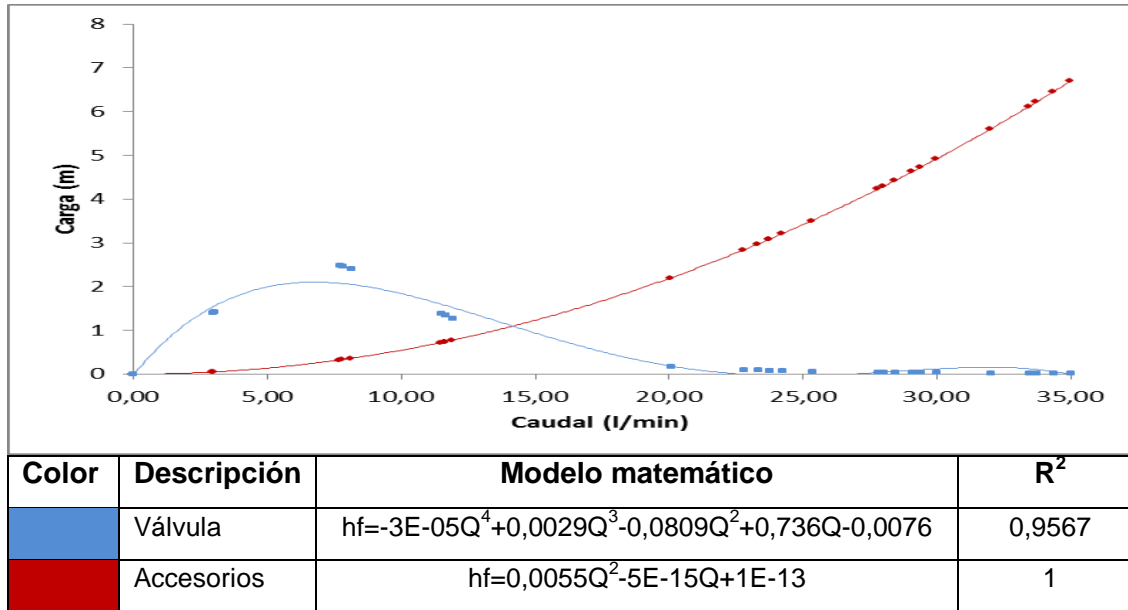
Fuente: elaboración propia.

Figura 28. Comparación de la pérdida de carga ocasionada por la válvula de estrangulación y los accesorios en la succión de la bomba a 20 °C



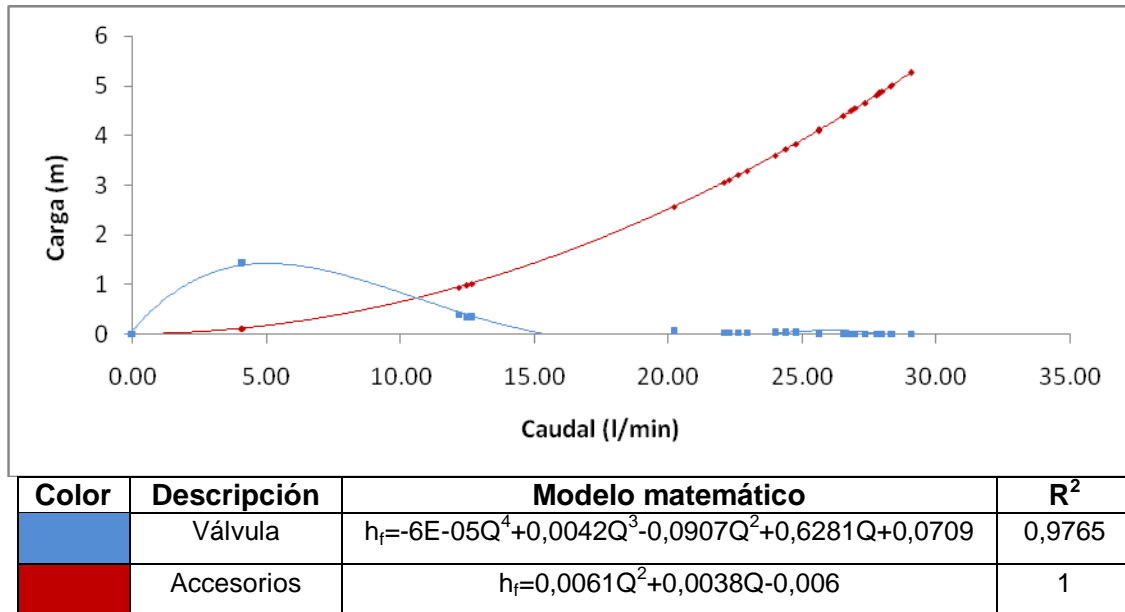
Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Comparación de la pérdida de carga ocasionada por la válvula de estrangulación y los accesorios en la succión de la bomba a 26 °C**



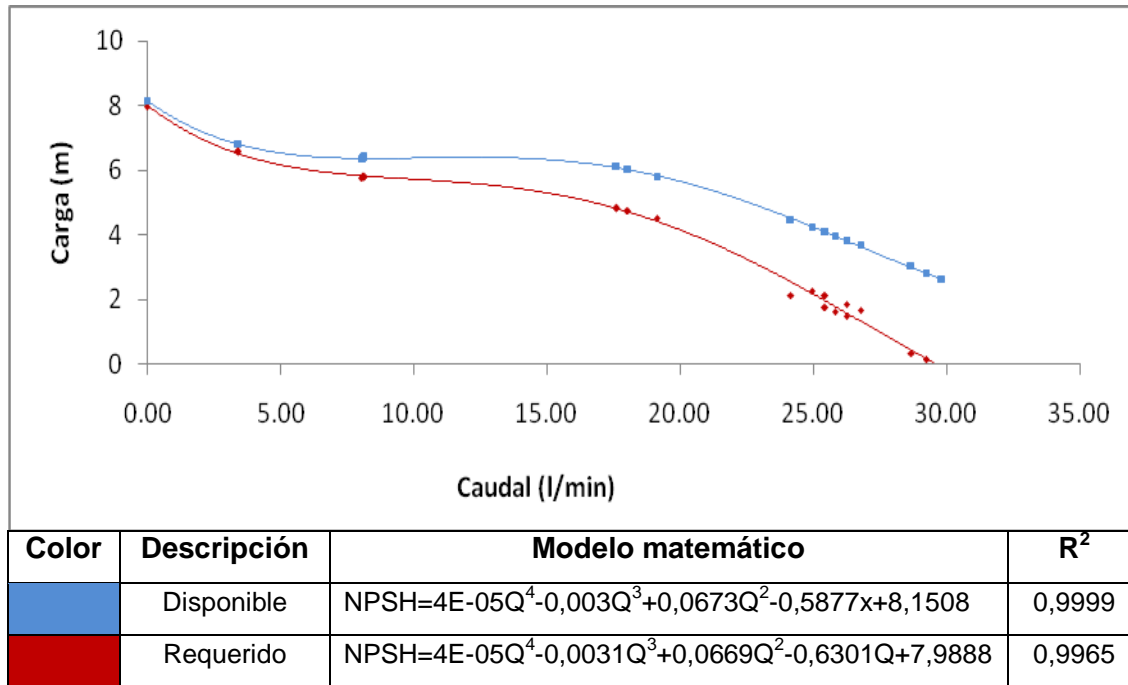
Fuente: elaboración propia.

Figura 30. Comparación de la pérdida de carga ocasionada por la válvula de estrangulación y los accesorios en la succión de la bomba a 40 °C



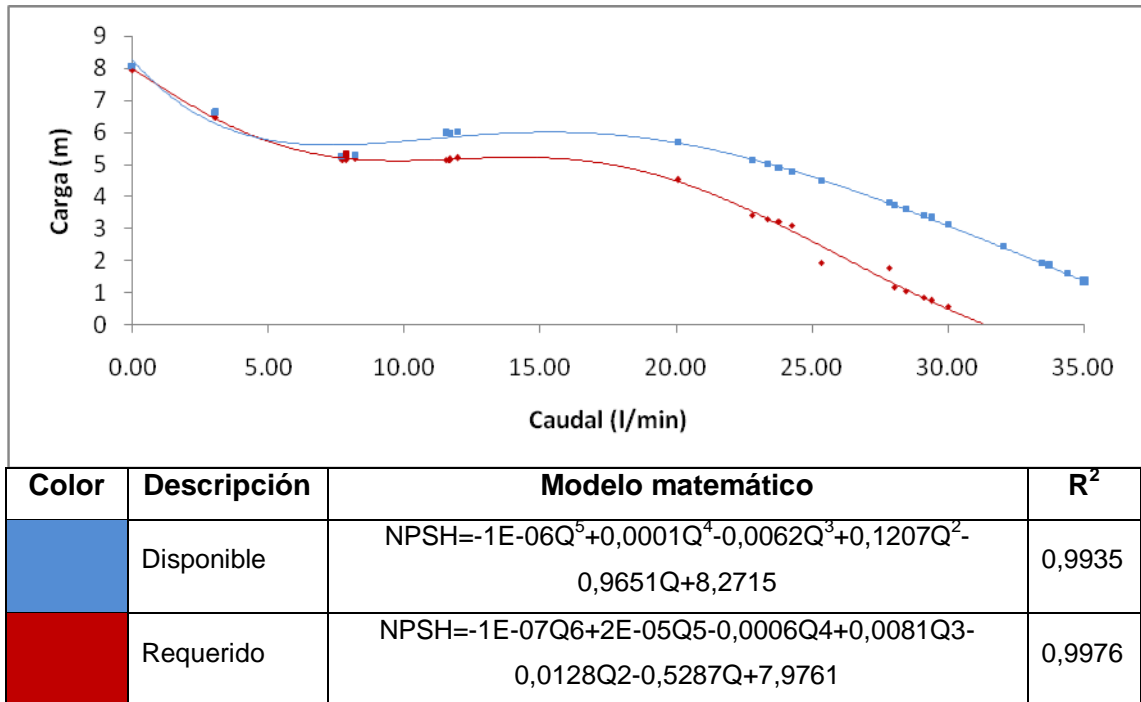
Fuente: elaboración propia.

Figura 31. Comparación del NPSH disponible y requerido a 20 °C



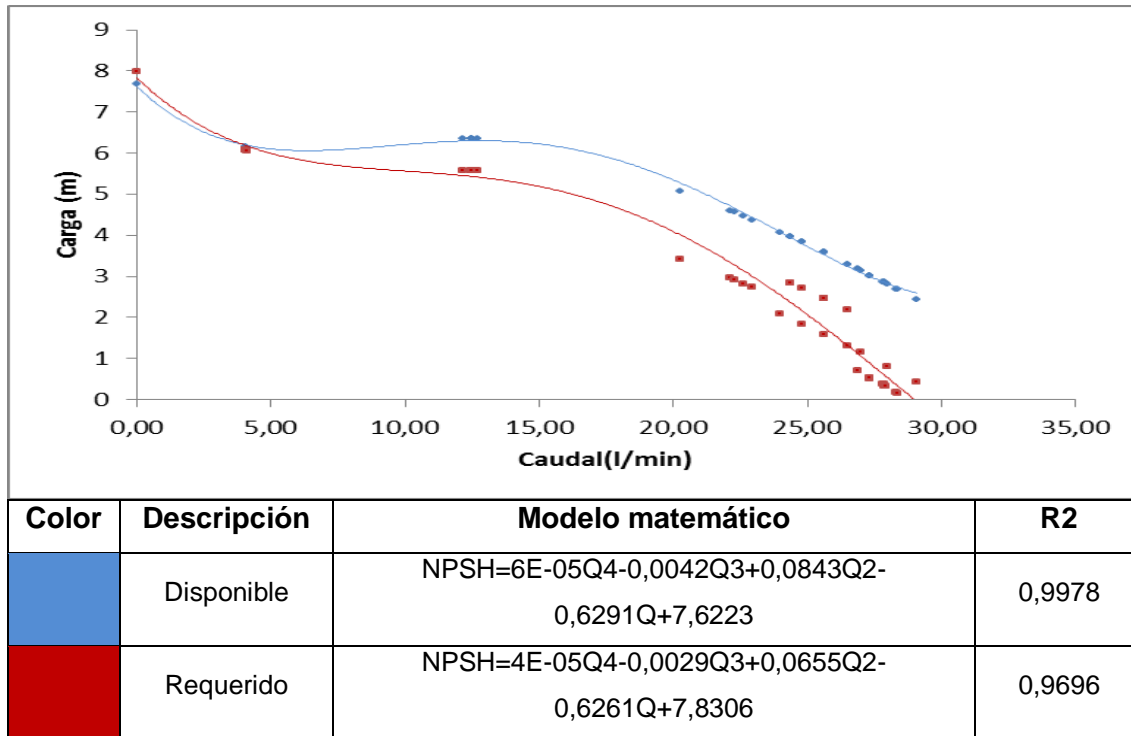
Fuente: elaboración propia.

Figura 32. Comparación del NPSH disponible y requerido a 26 °C



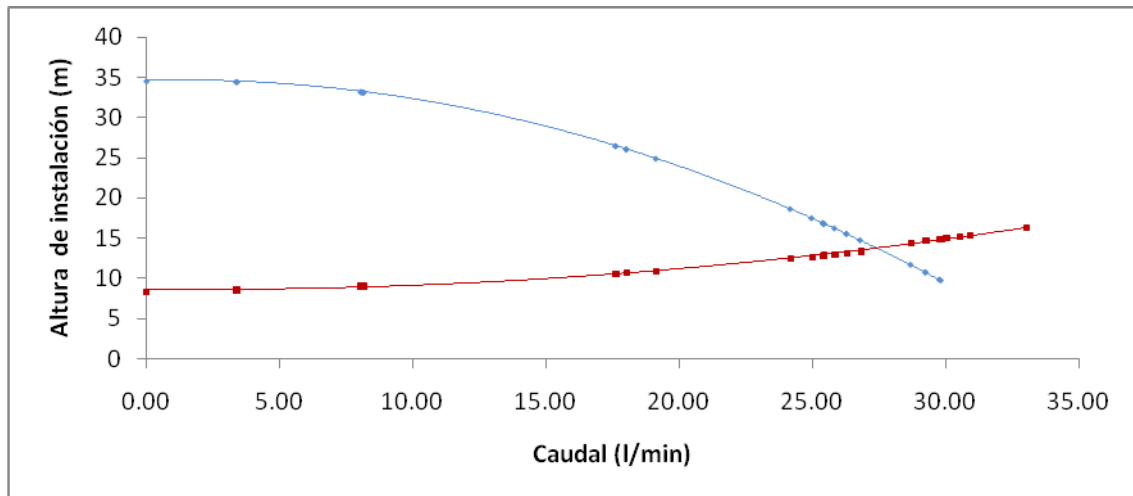
Fuente: elaboración propia.

Figura 33. Comparación del NPSH disponible y requerido a 40 °C



Fuente: elaboración propia.

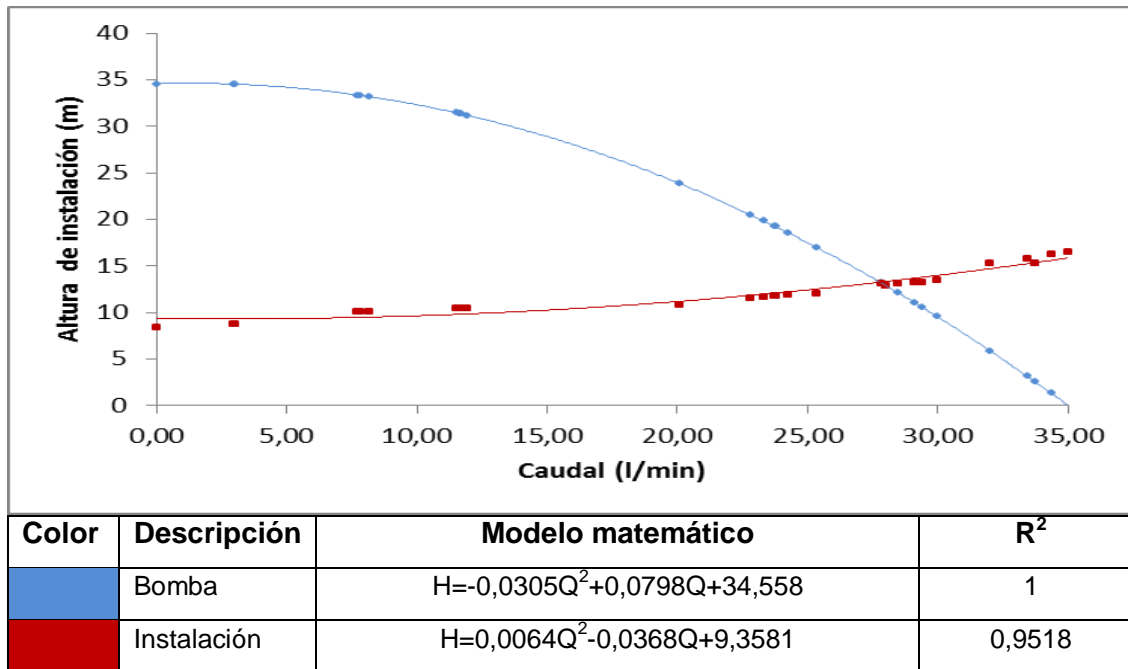
Figura 34. **Comparación de la curva característica de la bomba e instalación a 20 °C**



Color	Descripción	Modelo matemático	R ²
	Bomba	$H = -0,0305Q^2 + 0,0798Q + 34,558$	1
	Instalación	$H = 0,0079Q^2 - 0,0323Q + 8,6415$	0,9974

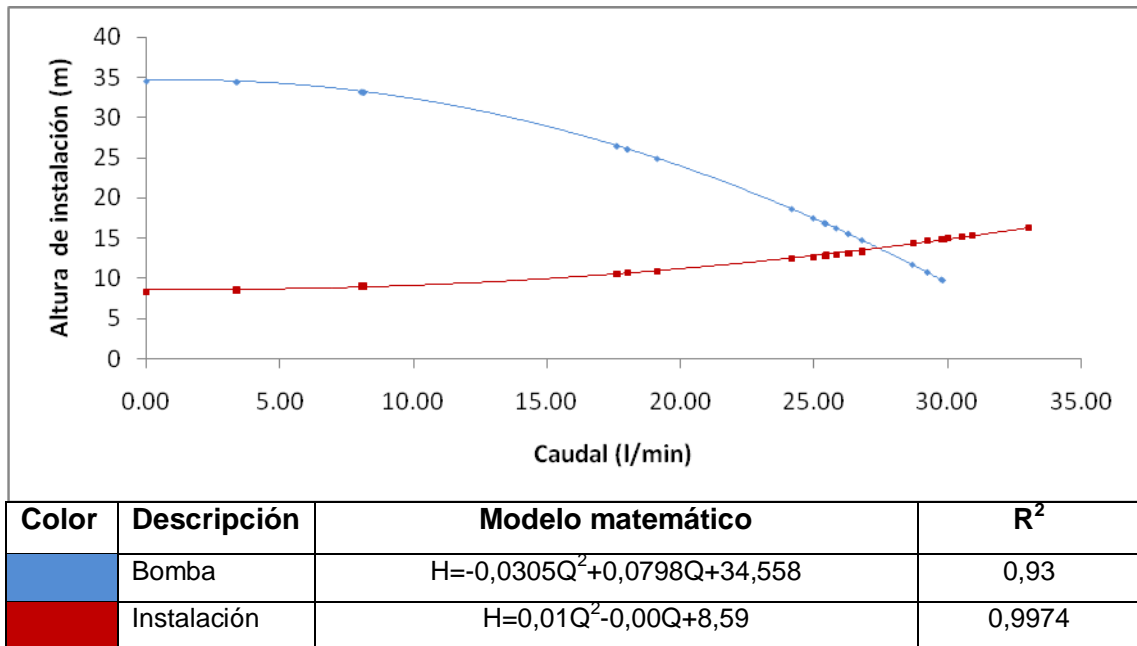
Fuente: elaboración propia.

Figura 35. Comparación de la curva característica de la bomba e instalación a 26 °C



Fuente: elaboración propia.

Figura 36. **Comparación de la curva característica de la bomba e instalación a 40 °C**



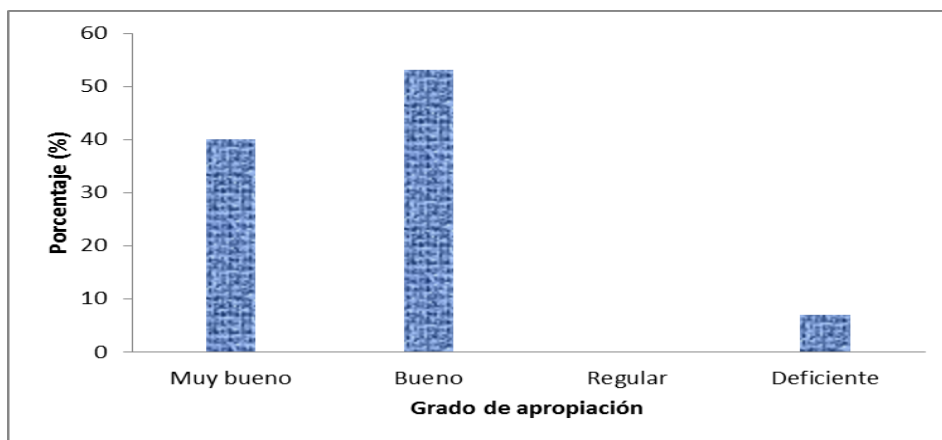
Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Caudal y altura máxima de operación a diferentes temperaturas**

Temperatura (°C)	Caudal (l/min)	Altura (m)
20	27,48	13,72
26	27,76	13,83
40	26,33	13,28

Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **Grado de apropiación del tópic**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 37 expone la ponderación del grado de apropiación de los estudiantes, el cual se clasifica de la siguiente manera:

Clasificación	Ponderación	Porcentaje (%)
Muy bueno	90-100	40
Bueno	75-89	53
Regular	61-74	0
Deficiente	0-60	7

4.1. Práctica experimental

La práctica experimental desarrollada, propone el tema de estudio, objetivos, procedimiento de cálculo para la obtención de estos, para los estudiantes del Laboratorio de Ingeniería Química 1.

4.1.1. Tema

Determinación del comportamiento de las variables que inciden en el fenómeno de la cavitación.

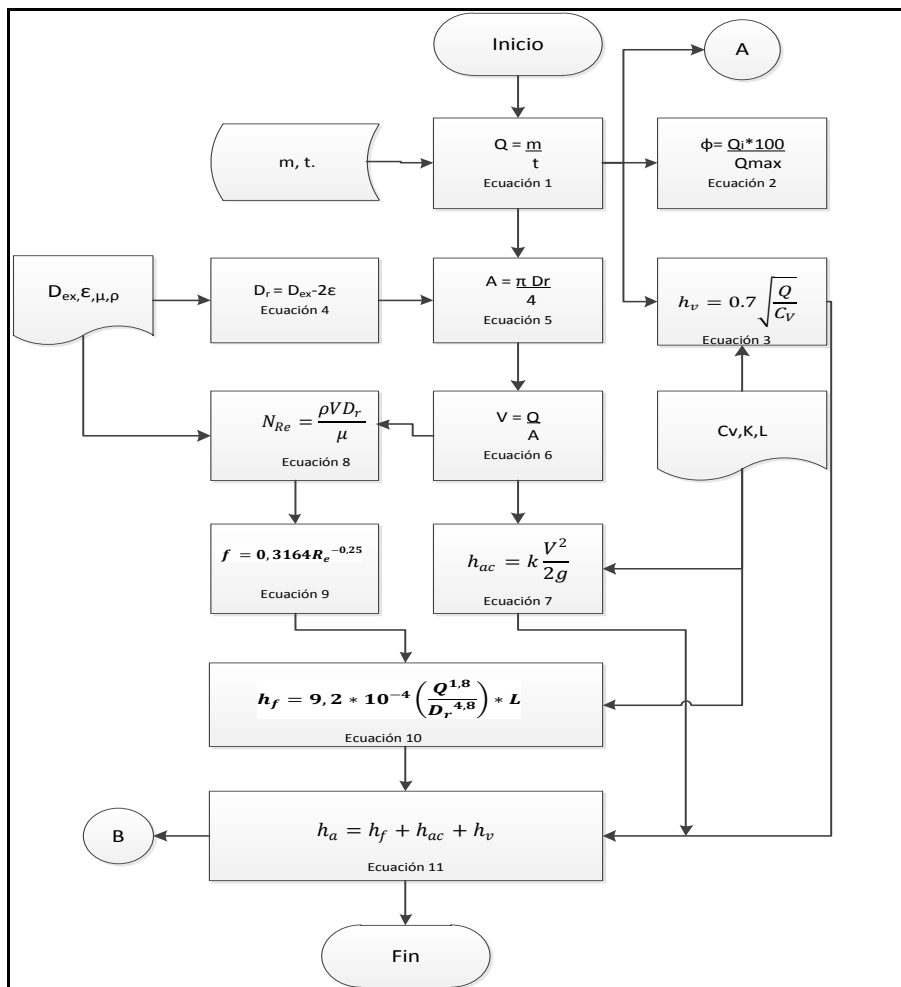
4.1.2. Objetivos

- Realizar el diagrama de flujo de la unidad de cavitación.
- Estimar la pérdida de carga que se obtiene al estrangular la válvula de bola en la succión de la bomba, según su porcentaje de abertura.
- Evaluar el efecto de la pérdida de carga, presión de vapor y temperatura en el fenómeno de cavitación.
- Determinar el comportamiento gráfico del NPSH disponible y requerido en función del caudal.
- Dibujar las curvas características de la bomba y de la instalación en función del caudal.

4.1.3. Procedimiento de cálculo

En la figura 38 se muestra un procedimiento lógico y sistemático para el de cálculo matemático y obtención de comportamientos gráficos para la alcanzar los objetivos establecidos.

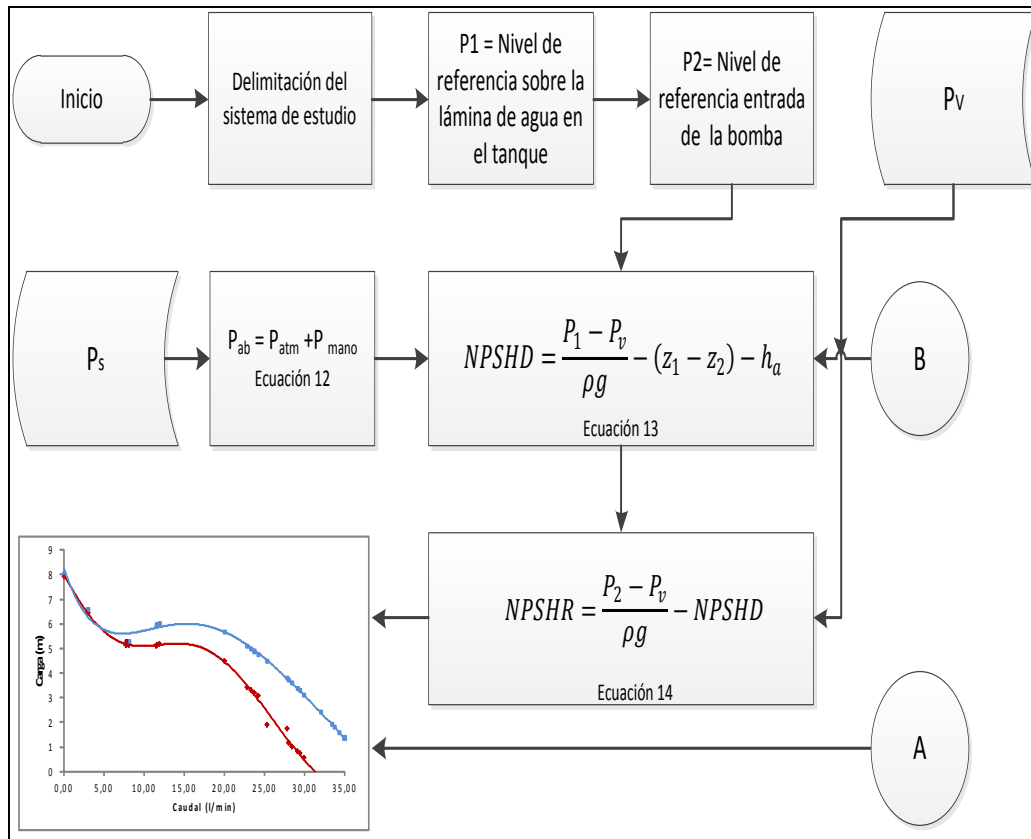
Figura 38. Diagrama de procedimiento de cálculo de pérdidas de carga



Fuente: elaboración propia.

Nota: la viscosidad que siendo el agua un fluido Newtoniano su magnitud no varía significativamente en el rango de estado líquido.

Figura 39. Diagrama de cálculo de NPSH disponible y requerido



Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. Descripción de ecuaciones utilizadas en las figuras 38 y 39

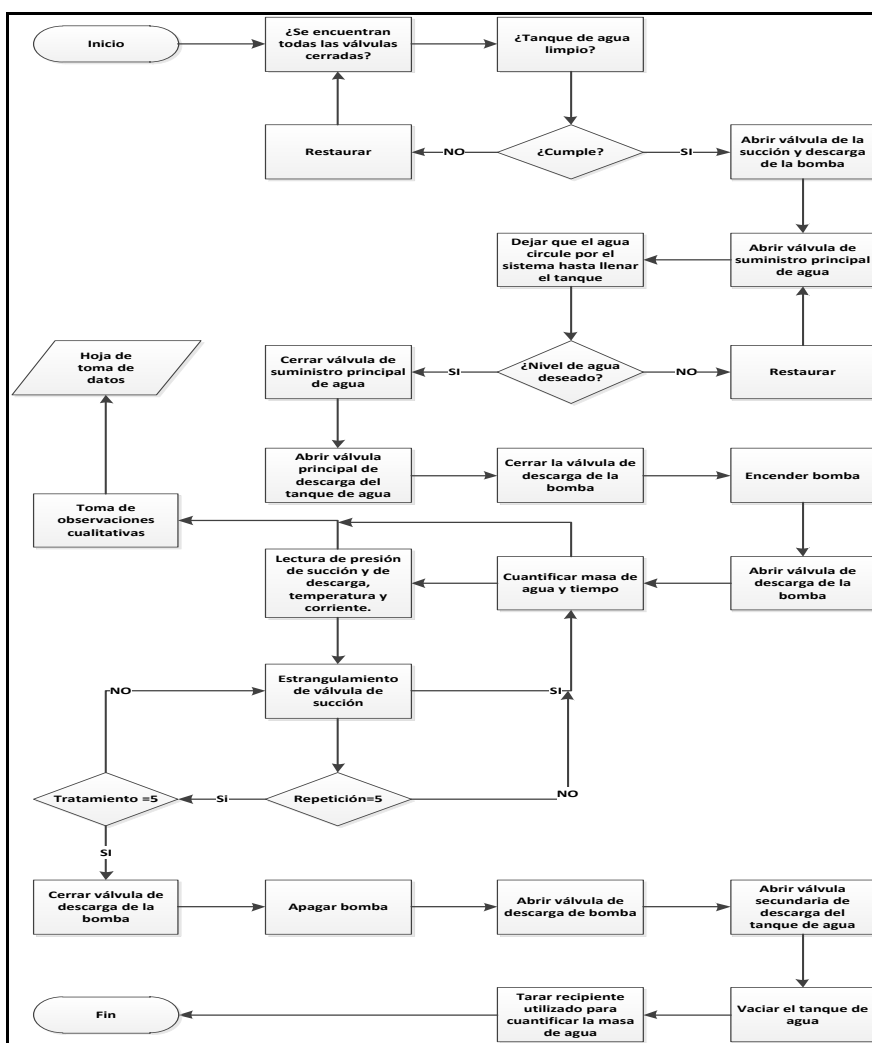
Ecuación	Descripción	Variable	Dimensional
1	Caudal	m = masa	Kg
		t = Tiempo	S
2	Abertura de válvula en succión	Φ =Abertura de válvula	%
		Q_{max} = caudal mayor en la serie de datos	m ³ /s
		Q_i = Cada caudal en la serie de datos	m ³ /s
3	Pérdida de carga en válvula de estrangulamiento	Q = Caudal volumétrico	GPM
		Cv= capacidad de válvula	GPM/(PSI) ^{1/2}
		0.7 = Factor de conversión de PSI a m.c.a.	
4	Diámetro real de la tubería	D_r = Diámetro real	m
		D_{ex} = Diámetro externo	m
		ϵ = Espesores de la tubería	m
5	Área de la sección transversal	Π = 3.1416	Adimensional
		A= Área de tubería	m ²
		Q = Caudal volumétrico	m ³ /s
6	Velocidad del fluido	V = velocidad del fluido	m/s
7	Pérdida de carga en accesorios	K= constante adimensional característica de cada accesorio	m
8	Número de Reynolds	P = Densidad del fluido a la temperatura de operación	Kg/m ³
		μ = Viscosidad cinemática del fluido a la temperatura de operación	N*s/m ²
9	Factor de fricción	f = Factor de fricción	
10	Pérdida de carga por fricción	h_f = Pérdida de carga por fricción en la tubería	m
11	Pérdida total de carga	h_a = Pérdida total de carga	m
12	Presión absoluta	P_a = presión atmosférica	m.c.a
		P_{mano} = presión medida en el manovacuómetro	m.c.a
13	NSPHD	P1= Presión atmosférica	m.c.a
		Pv = Presión de vapor a la temperatura de operación	m.c.a
		Z1= Nivel de referencia (cero)	m
		Z2 = Altura hasta el eje de la succión de la bomba	m
14	NPSHR	P2 = Presión absoluta en la succión de la bomba	m

Fuente: elaboración propia.

4.2. Guía de operación y mantenimiento

La elaboración de una guía de operación y mantenimiento del equipo instalado en el Laboratorio de Ingeniería Química, busca facilitar las actividades de mantenimiento y alargar la vida útil de este con un correcto uso y manejo.

Figura 40. Diagrama de operación del equipo de cavitación



Fuente: elaboración propia.

4.2.1. Mantenimiento preventivo

El objetivo es evitar o mitigar las consecuencias de los fallos del equipo, logrando prevenir las incidencias antes de que estas ocurran. Es el destinado a la conservación mediante revisiones y reparaciones que garanticen el buen funcionamiento y fiabilidad del equipo. Se realiza en el equipo en condiciones de funcionamiento. Las tareas de mantenimiento preventivo incluyen las acciones mostradas en la tabla XII.

Tabla XII. **Actividades de mantenimiento preventivo**

Actividad / Equipo		Procedimiento
Limpieza	Tanque	Lavar con una esponja y detergente por dentro y por fuera y retirar el detergente con abundante agua.
	Tubería de pírex	Hacer circular agua a alta velocidad por el sistema (bomba encendida) en circuito cerrado. Si fuera necesario lavar (detergente y agua) por separado la tubería de succión y descarga utilizando las uniones universales que permiten separarlas.
Inspección	Manovacúómetros	Si la lectura del manovacúómetro y el vacúómetro colocado en la succión de la bomba, no supera las 15 pulgadas de mercurio, es necesario realizar el cambio de éstos. (Se debe de calibrar cada año)
Operación	Disoluciones	El uso de diluciones de alcohol etílico puede realizarse siempre y cuando se manejen diluciones por debajo del 5 % en peso. Para prolongar la vida útil de los empaques y sellantes.

Fuente: elaboración propia.

4.2.2. Mantenimiento predictivo

Trata de determinar el momento en el cual se deben efectuar las reparaciones a través de la interpretación de indicadores apropiados en cada equipo analizado.

Tabla XIII. **Actividades de mantenimiento predictivo**

Actividad	Procedimiento
Vibraciones en la bomba	Los daños provocados por el tiempo y por el tipo de esfuerzos a los que se encuentra sometida la bomba centrífuga, provocará que con el uso esta empiece a vibrar en condiciones normales de operación e indicará la necesidad de reemplazo.
Alineación de bomba	La tubería de pírax de la succión y la descarga de inicio a fin deben estar paralelas, con lo cual se asegurará que la bomba centrífuga se encuentre alineada a estas.
Burbujas fuera de control	Las burbujas fuera de control y en un tiempo prolongado (más de dos minutos, válvula de estrangulación totalmente abierta), es un indicador de fugas en el área de succión.

Fuente: elaboración propia.

4.2.3. Mantenimiento correctivo

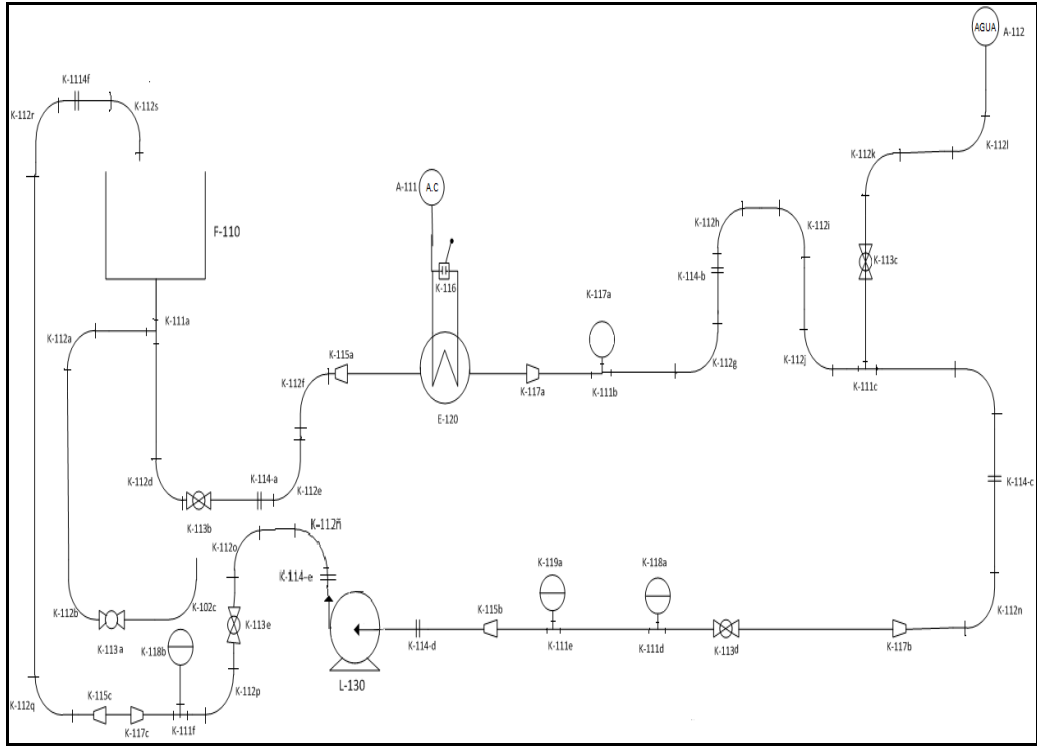
Corrige los defectos observados en el equipo. Consiste en localizar averías o defectos y repararlos.

Tabla XIV. **Actividades de mantenimiento correctivo**

Actividad	Procedimiento
Fugas	<p>El equipo comprende dos partes succión y descarga.</p> <p>Las fugas que se encuentren en la succión se pueden localizar si se observan burbujas de aire descontroladas en la tubería de pírex (válvula de estrangulación totalmente abierta) durante un tiempo mayor de dos minutos, estas deben de repararse utilizando silicón en las uniones roscadas de HG, mientras que en PVC es necesario que se reemplace la pieza y se pegue correctamente.</p> <p>Las fugas localizadas en la descarga, se observan debido al afloramiento de agua, estas deben repararse tradicionalmente.</p>
Cambio de manovacuómetros	<p>Los manovacuómetros son de un rango de 30 pulgadas de mercurio a 30 PSI, los cuales tienen una conexión de ¼ de diámetro, es necesario colocar silicón en la rosca para evitar fugas que permitan la entrada de aire al sistema.</p>
Cambio de resistencias	<p>Si el calentador no realiza su función es necesario realizar el cambio de resistencias eléctricas de inmersión.</p>



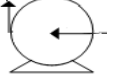












Fuente: elaboración propia.

Figura 41. Esquema del equipo de cavitación



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

Tabla XV. Descripción de los componentes del equipo de cavitación

Simbología	Código	Descripción	Material	Diámetro nominal (plg)
	k-118a-b	Manovacúmetro	HG	¼
	K-119	Vacuómetro	HG	¼
	k-117a	Termómetro	HG	¼
	L-130	Bomba centrífuga	HG	1X1
	K-114a-f	Unión universal	PVC	½
			PVC	1
			HG	1
	k-112a-s	Codo 90°	PVC	½
			PVC	1
			HG	1
	K-111a-f	tees	HG	½
				1
				1 ¼
	K-117a-c	Reducción	HG	1-½
				1 ¼- 1
				1 ¼- ½
	k-115a-c	Expansión	HG	½ -1
				½ - 1 ¼
				1-1 ¼
	K-113a-e	Válvula de bola	HG	1 ¼
			PVC	½
		Tubería de pírex	-----	150 m
		Tubería de PVC	-----	0.90 m
		Área de instalación de equipo	-----	1 m ²
	E-120	Calentador de paso	-----	-----
	K 116	Interruptor	-----	-----
	A-112	Agua	-----	-----
	A-111	Energía eléctrica	-----	-----

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La figura 24 muestra el equipo que fue utilizado para la demostración del fenómeno de la cavitación en forma física y visual. Consta de una bomba centrífuga de 0,5 hp, dos manovacúómetros, un vacuómetro y tubería de pírex en la succión y en la descarga (1,50 metros), tanque pírex que permite la recirculación del agua en el sistema y una válvula de bola colocada previo a la tubería de succión que al estrangular el paso del fluido permite que la presión local disminuya por debajo de la presión de vapor del agua a la temperatura de operación y como consecuencia la formación de burbujas, las cuales fueron visualizadas en la tubería de pírex.

En la figuras 25, 26 y 27 se representa el comportamiento de la presión en la succión de la bomba con respecto a la presión de vapor del agua. Confirma que a caudales menores de cinco litros por minuto, se igualó la presión de vapor del agua a la temperatura de operación de 20 grados Celsius, y se estuvo por debajo de esta a 26 y 40 grados Celsius. Representa que a mayor pérdida de carga causada por el estrangulamiento de la válvula se visualizó el fenómeno de la cavitación, siendo mejor apreciado en el tubo de pírex a 26 y 40 grados Celsius. Se observa que la temperatura de operación ayudó a la observación del fenómeno.

Debido que el estrangulamiento de la válvula fue el mecanismo utilizado para disminuir la carga neta de la aspiración sobre la presión de vapor (NPSH), por medio del aumento de la pérdida de carga en la succión de la bomba, es posible observar en los gráficos representados en las figuras 28, 29 y 30 que esta incidió de gran manera en caudales menores e iguales a cinco litros por minuto.

Al momento de la estrangulación se redujo el área de paso y por lo tanto disminuyó el caudal, lo cual afectó para obtener el comportamiento teórico de las curvas representadas en figuras 31, 32 y 33.

Para obtener el comportamiento teórico se debería colocar un motor de velocidad variable que permitiera mantener el caudal constante para cada estrangulación y por lo tanto que en la reducción del área de paso exista un aumento de velocidad del fluido. También se observa que las pérdidas de carga provocadas por los accesorios en la succión de la bomba son directamente proporcional al caudal confirmando la teoría, mientras que el efecto de las pérdidas ocasionadas por la válvula presenta un máximo y posteriormente su efecto es inversamente proporcional al caudal. Se puede observar que a caudales mayores (válvula totalmente abierta) su incidencia es casi nula.

Para 20, 26 y 40 grados Celsius, el comportamiento es similar debido que el aumento de la temperatura de operación es independiente de las pérdidas de carga.

En las figuras 31, 32 y 33 se representó la carga neta en la aspiración que dispone el líquido en el punto mencionado y la energía mínima que se requiere que tenga el líquido en la succión de la bomba para que no se produzca cavitación. Debido que el factor de seguridad que representa la distancia paralela entre las dos curvas es la diferencia de presión de vapor y la presión local a la entrada de la bomba, es posible observar que este factor es alcanzado y superado para un caudal menor e igual a cinco litros por minuto, para temperaturas de operación de 26 y 40 grados Celsius, mientras que para 20 grados Celsius solo se aproximan entre sí.

En la figuras 34, 35 y 36 se observa las representaciones gráficas de la curva característica de la bomba y de la instalación. Estas representan el punto óptimo de operación de la bomba. La altura manométrica de la instalación es la diferencia de energías entre ambos depósitos más la pérdida de carga en las tuberías de aspiración e impulsión. La curva característica de la bomba (otorgada por el fabricante) es la energía útil que la bomba le comunica al líquido para un determinado caudal. La intersección de ambas curvas permite conocer el caudal en el cual la bomba trabaja de forma óptima.

La tabla X, muestra que el caudal a 20 y 26 grados Celsius es aproximadamente 28 litros por minuto, mientras que la altura manométrica es de 14 metros, pero para una temperatura de operación de 40 grados Celsius el caudal máximo disminuyó a 26 litros por minuto y la altura a 13 metros. Esto indica que el efecto de la temperatura incide en la reducción del caudal y la altura máxima de operación de forma apreciable únicamente a altas temperaturas, debido a los fenómenos que se propician con el aumento de temperatura.

El grado apropiación del tópico por los estudiantes del curso de Laboratorio de Ingeniería Química 1, fue obtenido a través del desarrollo de la práctica experimental. Como producto se obtuvo un informe técnico por cada grupo de trabajo (15 grupos).

El informe técnico se integró de los siguientes componentes: glosario general, introducción, resumen, marco teórico, objetivos, resultados, discusión de resultados, conclusiones, recomendaciones, muestra de cálculo, diagrama del procedimiento experimental, diagrama del equipo, tablas de datos calculados, referencias bibliográficas y anexos. Siendo los resultados, interpretación de resultados y conclusiones los componentes transcendentales que reflejaron el dominio del tema.

Durante el desarrollo de la práctica los grupos de trabajo fueron tutorados por el investigador del trabajo de graduación. Fue una etapa transcendental que permitió observar la evolución de los conocimientos adquiridos y apropiación del tema de forma personalizada de cada grupo de trabajo.

El grado de apropiación evaluado a partir de los informes técnicos realizados por los estudiantes del Laboratorio de Ingeniería Química 1, se encuentra representado en la figura 37, observando que un 40 % de los estudiantes tuvieron una apropiación muy buena, 53 % buena y 7 % deficiente. Se concluye que los estudiantes que comprendieron el tópico formaron parte del 93 % del grupo evaluado.

CONCLUSIONES

1. La pérdida de carga ocasionada por el estrangulamiento de la válvula en la succión de la bomba es inversamente proporcional al flujo volumétrico.
2. La temperatura de operación no incide de forma significativa en la pérdida de carga ocasionada por accesorios.
3. Las curvas del NPSH disponible y requerido no mostraron el comportamiento teórico, debido que no fue posible mantener el caudal constante con la estrangulación de la válvula en la succión de la bomba.
4. El máximo caudal y altura de operación de la bomba es de 28 litros por minuto y 14 metros a una temperatura de 20 y 26 grados Celsius. Para 40 grados Celsius es de 26 litros por minuto y 13 metros.
5. El efecto del incremento de la temperatura favorece la observación visual del fenómeno de la cavitación.
6. Es posible producir y estudiar el fenómeno de la cavitación en el equipo armado e instalado en el Laboratorio de Ingeniería Química.
7. A partir del procedimiento de evaluación se demuestra con los resultados estadísticos un grado de apropiación de 93 %, observando que un 40 % de los estudiantes tuvieron una apropiación muy buena, 53 % buena y 7 % deficiente.

RECOMENDACIONES

1. Acoplar un manómetro diferencial para que facilite la lectura de la presión de forma directa en la entrada y salida de la bomba.
2. Realizar el estudio a mayores temperaturas, para lo cual será necesario cambiar el tipo de bomba (para agua caliente) y la tubería de PVC a CPVC.
3. Utilizar mezclas de alcohol etílico de concentraciones menores a 5 % en peso en el quipo instalado, para evitar daños en los empaques y sellantes utilizados.
4. Colocar un manovacuómetro que preceda a la válvula de estrangulamiento, para obtener la caída de presión ocasionada por esta acción, de forma directa.
5. Evolucionar el equipo con sistemas automáticos de toma de datos y funcionamiento.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALMANDOZ BERRONDO, Jabier; MONGELOS OQUIÑENA, María Belén. PELLEJERO SALABERRIA, Idiola. *Apuntes de máquinas hidráulicas*. [en línea] Departamento de Ingeniería Nuclear y Mecánica de Fluidos. Escuela Universitaria Politécnica, Unibertsitate Eskola Politeknikoa. Donostia-San Sebastián. 337p. ftp://ftp.ehu.es/cidirb/profs/inppebei/MH_EVP_donosti_07-08.pdf. [Consulta: noviembre del 2011].
2. CHÁVEZ MONTUFAR, Julio; GALVÁN ESTRADA Manuel. *Balance de materiales y energía*. Guatemala: Editorial Universitaria. vol 1. 1998. 248 p.
3. *Flujo en conductos cerrados*. [en línea]. Ingeniería Industrial, Hidráulica Aplicada, Área mecánica de fluidos, Departamento de Tecnología, 40 p. http://www.amf.uji.es/valvulas_325.pdf. [Consulta: 18 de diciembre de 2012]
4. MERCHEGIANI, Ariel. *Cavitación*. Argentina: Universidad Nacional de Comahue, Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica Aplicada, Laboratorio de Máquinas Hidráulicas, 2006. 26 p.
5. PERRY, Robert H. *Manual del ingeniero químico*. 6a ed. México: McGraw-Hill,1992. 2577 p.

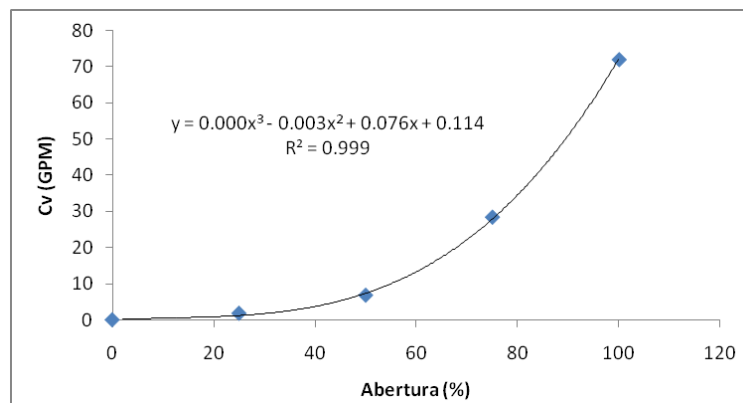
6. REYES DE LA CRUZ, Jorge Luis; RUIZ CHAVARRÍA, Gerardo; HERNÁNDEZ ZAPATA, Sergio. “Experimento de enseñanza e investigación sobre el fenómeno de la cavitación en bombas centrífugas”. Latin American Journal of Physics Education. Nov. 2010, vol 4, suppl. 1, p. 915-924.

7. REYES MAZARIEGOS, Menphis Sofonias. *Aplicación del diseño experimental en el desarrollo de las prácticas internas, en el área de operaciones unitarias*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 2009. 133 p.

8. *STERLING SIHI. Principios básicos para el diseño de instalaciones de bombas centrífugas*. [en línea][ref. de 2003] Disponible en Web: www.supplyequip.com/pdf/SIHI-Liq-Principios8%E1sicos.pdf.

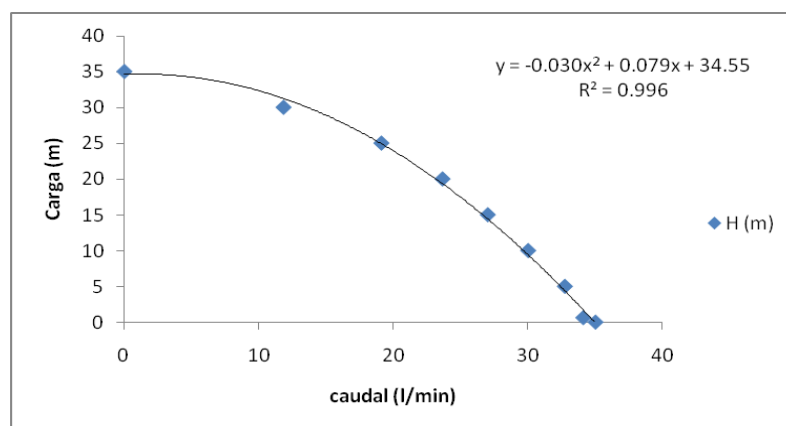
APÉNDICES

Apéndice 1. Coeficiente de capacidad de la válvula de bola según porcentaje de abertura



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Curva característica de la bomba centrífuga utilizada



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Datos calculados para la temperatura de operación de 20 °C**

Temperatura	Presión de vapor	Densidad	Presión atmosférica	Presión entrada	Presión salida	Caudal
Celcius	(m.c.a.)	kg/m3	(m.c.a.)	(m.c.a.)	(m.c.a.)	(l/min)
20	2337	998,30	84210	0,450	8,590	0,000
20	2337	998,30	84210	0,479	7,479	3,359
20	2337	998,30	84210	0,479	7,479	3,402
20	2337	998,30	84210	0,829	7,829	8,032
20	2337	998,30	84210	0,829	7,829	8,075
20	2337	998,30	84210	0,829	7,829	8,105
20	2337	998,30	84210	0,829	7,829	8,149
20	2337	998,30	84210	0,829	7,829	8,149
20	2337	998,30	84210	1,529	9,579	17,596
20	2337	998,30	84210	1,529	9,579	17,617
20	2337	998,30	84210	1,529	9,579	17,996
20	2337	998,30	84210	1,529	9,579	18,018
20	2337	998,30	84210	1,529	9,579	19,118
20	2337	998,30	84210	2,579	10,629	24,159
20	2337	998,30	84210	2,229	10,279	24,962
20	2337	998,30	84210	2,579	10,629	25,384
20	2337	998,30	84210	2,229	10,279	25,384
20	2337	998,30	84210	2,579	10,629	25,426
20	2337	998,30	84210	2,229	10,279	25,426
20	2337	998,30	84210	2,579	10,629	25,820
20	2337	998,30	84210	2,579	10,629	26,271
20	2337	998,30	84210	2,229	10,279	26,271
20	2337	998,30	84210	2,229	10,279	26,786
20	2337	998,30	84210	2,929	11,329	28,678
20	2337	998,30	84210	2,929	11,329	29,236
20	2337	998,30	84210	2,929	11,329	29,236
20	2337	998,30	84210	2,929	11,329	29,757
20	2337	998,30	84210	2,929	11,329	29,816

Continuación del apéndice 3.

Velcidad (m/s)					
pvc 1/2"	pvc 1"	hg1/2"	hg 1"	pirex 1"	hg 1 1/4"
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,297	0,168	0,232	0,081	0,152	0,050
0,300	0,170	0,235	0,082	0,154	0,051
0,709	0,402	0,555	0,194	0,365	0,121
0,713	0,404	0,558	0,195	0,367	0,121
0,716	0,405	0,560	0,196	0,368	0,122
0,720	0,408	0,563	0,197	0,370	0,122
0,720	0,408	0,563	0,197	0,370	0,122
1,554	0,880	1,215	0,426	0,799	0,264
1,556	0,881	1,217	0,426	0,800	0,264
1,590	0,900	1,243	0,435	0,817	0,270
1,591	0,901	1,244	0,436	0,818	0,270
1,689	0,956	1,320	0,462	0,868	0,287
2,134	1,208	1,668	0,584	1,097	0,363
2,205	1,248	1,724	0,604	1,133	0,375
2,242	1,269	1,753	0,614	1,152	0,381
2,242	1,269	1,753	0,614	1,152	0,381
2,246	1,271	1,756	0,615	1,154	0,382
2,246	1,271	1,756	0,615	1,154	0,382
2,281	1,291	1,783	0,625	1,172	0,388
2,320	1,314	1,814	0,635	1,193	0,394
2,320	1,314	1,814	0,635	1,193	0,394
2,366	1,339	1,850	0,648	1,216	0,402
2,533	1,434	1,980	0,694	1,302	0,430
2,582	1,462	2,019	0,707	1,327	0,439
2,582	1,462	2,019	0,707	1,327	0,439
2,628	1,488	2,055	0,720	1,351	0,447
2,634	1,491	2,059	0,721	1,354	0,448

Continuación del apéndice 3.

Re					
pvc 1/2"	pvc 1"	hg1/2"	hg 1"	pirex 1"	hg 1 1/4"
0	0	0	0	0	0
4166	3134	3683	2180	2986	1717
4219	3175	3731	2208	3025	1739
9961	7495	8808	5213	7141	4106
10015	7535	8855	5241	7180	4128
10052	7564	8888	5260	7207	4144
10107	7605	8937	5289	7246	4166
10107	7605	8937	5289	7246	4166
21823	16421	19296	11420	15646	8996
21849	16440	19319	11433	15664	9007
22320	16794	19735	11680	16002	9201
22347	16814	19759	11694	16021	9212
23711	17841	20966	12408	16999	9775
29963	22545	26494	15680	21482	12352
30959	23294	27374	16201	22195	12762
31482	23688	27836	16474	22570	12978
31482	23688	27836	16474	22570	12978
31535	23728	27883	16502	22608	13000
31535	23728	27883	16502	22608	13000
32023	24095	28314	16757	22958	13201
32582	24516	28809	17050	23359	13432
32582	24516	28809	17050	23359	13432
33221	24997	29374	17385	23817	13695
35567	26762	31448	18612	25499	14662
36259	27282	32060	18974	25995	14947
36259	27282	32060	18974	25995	14947
36905	27769	32632	19312	26458	15214
36979	27824	32696	19351	26511	15244

Continuación del apéndice 3.

Rugosidad relativa						Fanning					
pvc 1/2"	pvc 1"	hg1/2"	hg 1"	pirex 1"	hg 1 1/4"	pvc 1/2"	pvc 1"	hg1/2"	hg 1"	pirex 1"	hg 1 1/4"
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,039	0,042	0,041	0,046	0,043	0,049
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,039	0,042	0,040	0,046	0,043	0,049
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,032	0,034	0,033	0,037	0,034	0,040
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,032	0,034	0,033	0,037	0,034	0,039
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,032	0,034	0,033	0,037	0,034	0,039
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,032	0,034	0,033	0,037	0,034	0,039
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,032	0,034	0,033	0,037	0,034	0,039
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,026	0,028	0,027	0,031	0,028	0,032
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,026	0,028	0,027	0,031	0,028	0,032
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,026	0,028	0,027	0,030	0,028	0,032
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,026	0,028	0,027	0,030	0,028	0,032
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,025	0,027	0,026	0,030	0,028	0,032
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,024	0,026	0,025	0,028	0,026	0,030
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,024	0,026	0,025	0,028	0,026	0,030
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,024	0,026	0,024	0,028	0,026	0,030
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,024	0,026	0,024	0,028	0,026	0,030
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,024	0,025	0,024	0,028	0,026	0,030
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,024	0,025	0,024	0,028	0,026	0,030
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,024	0,025	0,024	0,028	0,026	0,030
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,024	0,025	0,024	0,028	0,026	0,030
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,024	0,025	0,024	0,028	0,026	0,029
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,024	0,025	0,024	0,028	0,026	0,029
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,023	0,025	0,024	0,028	0,025	0,029
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,023	0,025	0,024	0,027	0,025	0,029
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,023	0,025	0,024	0,027	0,025	0,029
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,023	0,025	0,024	0,027	0,025	0,029
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,023	0,025	0,024	0,027	0,025	0,028
0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,023	0,024	0,024	0,027	0,025	0,028

Continuación del apéndice 3.

Longitud de tubería (m)						Pérdida de carga por fricción en tubería (m)						hf
pvc 1/2"	pvc 1"	hg 1/2"	hg 1"	pirex 1"	hg 1 1/4"	pvc 1/2"	pvc 1"	hg 1/2"	hg 1"	pirex 1"	hg 1 1/4"	Total
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,009	0,000	0,001	0,000	0,003	0,000	0,013
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,009	0,000	0,001	0,000	0,003	0,000	0,013
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,043	0,002	0,003	0,001	0,014	0,000	0,062
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,043	0,002	0,003	0,001	0,015	0,000	0,063
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,044	0,002	0,003	0,001	0,015	0,000	0,063
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,044	0,002	0,003	0,001	0,015	0,000	0,064
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,044	0,002	0,003	0,001	0,015	0,000	0,064
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,176	0,007	0,011	0,002	0,059	0,000	0,256
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,176	0,008	0,011	0,002	0,060	0,000	0,257
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,183	0,008	0,011	0,002	0,062	0,000	0,267
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,184	0,008	0,011	0,002	0,062	0,000	0,267
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,204	0,009	0,013	0,003	0,069	0,000	0,297
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,311	0,013	0,019	0,004	0,105	0,000	0,453
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,330	0,014	0,020	0,004	0,111	0,001	0,481
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,340	0,014	0,021	0,004	0,115	0,001	0,495
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,340	0,014	0,021	0,004	0,115	0,001	0,495
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,341	0,015	0,021	0,004	0,115	0,001	0,497
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,341	0,015	0,021	0,004	0,115	0,001	0,497
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,351	0,015	0,022	0,004	0,118	0,001	0,511
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,362	0,015	0,022	0,004	0,122	0,001	0,527
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,362	0,015	0,022	0,004	0,122	0,001	0,527
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,375	0,016	0,023	0,005	0,127	0,001	0,546
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,424	0,018	0,026	0,005	0,143	0,001	0,617
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,439	0,019	0,027	0,005	0,148	0,001	0,639
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,439	0,019	0,027	0,005	0,148	0,001	0,639
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,453	0,019	0,028	0,006	0,153	0,001	0,660
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,455	0,019	0,028	0,006	0,153	0,001	0,662

Continuación del apéndice 3.

Pérdida por accesorios (m)								
Codos 90 1/2"	Codos 90 1"	reduc--1/2"	reduc--hg 1"	hg expa-1 1/4"	Valvula 1/2	hg expa-1 "	Tanque	Bomba
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,013	0,000	0,002	0,000	0,000	0,045	0,000	0,002	0,000
0,013	0,000	0,002	0,000	0,000	0,046	0,000	0,002	0,000
0,072	0,001	0,009	0,000	0,000	0,257	0,001	0,013	0,000
0,073	0,001	0,009	0,000	0,000	0,259	0,001	0,013	0,000
0,073	0,001	0,009	0,000	0,000	0,261	0,001	0,013	0,000
0,074	0,001	0,009	0,000	0,000	0,264	0,001	0,013	0,000
0,074	0,001	0,009	0,000	0,000	0,264	0,001	0,013	0,000
0,345	0,004	0,043	0,001	0,002	1,231	0,005	0,062	0,002
0,346	0,004	0,043	0,001	0,002	1,234	0,005	0,062	0,002
0,361	0,004	0,045	0,001	0,002	1,288	0,005	0,064	0,002
0,361	0,004	0,045	0,001	0,002	1,291	0,005	0,065	0,002
0,407	0,004	0,051	0,001	0,003	1,453	0,006	0,073	0,002
0,650	0,007	0,081	0,001	0,004	2,321	0,010	0,116	0,003
0,694	0,007	0,086	0,001	0,004	2,478	0,010	0,124	0,004
0,717	0,008	0,089	0,001	0,005	2,562	0,011	0,128	0,004
0,717	0,008	0,089	0,001	0,005	2,562	0,011	0,128	0,004
0,720	0,008	0,090	0,001	0,005	2,571	0,011	0,129	0,004
0,720	0,008	0,090	0,001	0,005	2,571	0,011	0,129	0,004
0,742	0,008	0,092	0,001	0,005	2,651	0,011	0,133	0,004
0,768	0,008	0,096	0,001	0,005	2,744	0,012	0,137	0,004
0,768	0,008	0,096	0,001	0,005	2,744	0,012	0,137	0,004
0,799	0,009	0,100	0,001	0,005	2,853	0,012	0,143	0,004
0,916	0,010	0,114	0,001	0,006	3,270	0,014	0,164	0,005
0,952	0,010	0,119	0,002	0,006	3,399	0,014	0,170	0,005
0,952	0,010	0,119	0,002	0,006	3,399	0,014	0,170	0,005
0,986	0,011	0,123	0,002	0,006	3,521	0,015	0,176	0,005
0,990	0,011	0,123	0,002	0,006	3,535	0,015	0,177	0,005

Continuación del apéndice 3.

Pérdida de válvula (abertura)				Primer término	NSPHD	F. seguridad	NSPHR
% de abertura	Cv	hf (psi)	hf (m.c.a)	(m)	(m)	(m)	(m)
0,000	0,114	0,000	0,000	8,160	8,160	0,212	7,948
11,265	0,659	1,810	1,267	8,160	6,819	0,241	6,578
11,410	0,664	1,830	1,281	8,160	6,803	0,241	6,562
26,937	1,509	1,971	1,380	8,160	6,365	0,591	5,774
27,082	1,524	1,955	1,368	8,160	6,372	0,591	5,781
27,184	1,534	1,943	1,360	8,160	6,377	0,591	5,786
27,332	1,549	1,926	1,348	8,160	6,385	0,591	5,793
27,332	1,549	1,926	1,348	8,160	6,385	0,591	5,793
59,016	12,628	0,135	0,095	8,160	6,115	1,292	4,823
59,086	12,676	0,134	0,094	8,160	6,111	1,292	4,819
60,359	13,588	0,122	0,085	8,160	6,036	1,292	4,744
60,432	13,642	0,121	0,085	8,160	6,032	1,292	4,739
64,122	16,563	0,093	0,065	8,160	5,798	1,292	4,506
81,029	35,853	0,032	0,022	8,160	4,492	2,344	2,148
83,721	39,942	0,027	0,019	8,160	4,252	1,993	2,258
85,135	42,215	0,025	0,018	8,160	4,122	2,344	1,778
85,135	42,215	0,025	0,018	8,160	4,122	1,993	2,129
85,279	42,451	0,025	0,017	8,160	4,109	2,344	1,765
85,279	42,451	0,025	0,017	8,160	4,109	1,993	2,116
86,598	44,657	0,023	0,016	8,160	3,986	2,344	1,642
88,112	47,287	0,021	0,015	8,160	3,842	2,344	1,499
88,112	47,287	0,021	0,015	8,160	3,842	1,993	1,849
89,840	50,415	0,020	0,014	8,160	3,675	1,993	1,682
96,183	63,120	0,014	0,010	8,160	3,034	2,694	0,340
98,054	67,249	0,013	0,009	8,160	2,836	2,694	0,142
98,054	67,249	0,013	0,009	8,160	2,836	2,694	0,142

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Datos calculados para la temperatura de operación de
26 °C**

Temperatura (°C)	Presión de vapor (m.c.a.)	Densidad kg/m ³	Presión atmosférica (Pa)	Presión entrada (m.c.a)	Presión salida (m.c.a)	Caudal L/min
26	3360	996,80	84210	0,450	8,590	0,000
26	3360	996,80	84210	0,479	7,479	2,991
26	3360	996,80	84210	0,479	7,479	3,024
26	3360	996,80	84210	0,479	7,479	7,725
26	3360	996,80	84210	0,479	7,479	7,846
26	3360	996,80	84210	0,479	7,479	8,166
26	3360	996,80	84210	1,179	9,229	11,523
26	3360	996,80	84210	1,179	9,229	11,639
26	3360	996,80	84210	1,179	9,229	11,657
26	3360	996,80	84210	1,179	9,229	11,675
26	3360	996,80	84210	1,179	9,229	11,925
26	3360	996,80	84210	1,529	9,579	20,065
26	3360	996,80	84210	2,054	10,104	22,802
26	3360	996,80	84210	2,054	10,104	23,332
26	3360	996,80	84210	2,054	10,104	23,737
26	3360	996,80	84210	2,054	10,104	23,774
26	3360	996,80	84210	2,054	10,104	24,234
26	3360	996,80	84210	2,929	10,804	25,335
26	3360	996,80	84210	2,404	10,629	27,817
26	3360	996,80	84210	2,929	10,804	28,024
26	3360	996,80	84210	2,929	10,979	28,448
26	3360	996,80	84210	2,929	10,804	29,108
26	3360	996,80	84210	2,929	10,804	29,393
26	3360	996,80	84210	2,929	10,804	29,978

Continuación del apéndice 4.

Velocidad (m/s)						Diámetros internos (m)					
pvc 1/2"	pvc 1"	hg1/2"	hg 1"	pirex 1"	hg 1 1/4"	pvc 1/2"	pvc 1"	hg1/2"	hg 1"	pirex 1"	hg 1 1/4"
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
0,264	0,150	0,207	0,072	0,136	0,045	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
0,267	0,151	0,209	0,073	0,137	0,045	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
0,682	0,386	0,533	0,187	0,351	0,116	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
0,693	0,392	0,542	0,190	0,356	0,118	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
0,721	0,408	0,564	0,198	0,371	0,123	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
1,018	0,576	0,796	0,279	0,523	0,173	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
1,028	0,582	0,804	0,282	0,528	0,175	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
1,030	0,583	0,805	0,282	0,529	0,175	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
1,031	0,584	0,806	0,282	0,530	0,175	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
1,053	0,596	0,823	0,288	0,541	0,179	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
1,772	1,003	1,386	0,485	0,911	0,301	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,014	1,140	1,575	0,552	1,035	0,342	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,061	1,167	1,611	0,564	1,059	0,350	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,097	1,187	1,639	0,574	1,078	0,356	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,100	1,189	1,642	0,575	1,079	0,357	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,140	1,212	1,673	0,586	1,100	0,364	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,238	1,267	1,750	0,613	1,150	0,380	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,457	1,391	1,921	0,673	1,263	0,418	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,475	1,401	1,935	0,678	1,272	0,421	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,513	1,423	1,964	0,688	1,292	0,427	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,571	1,456	2,010	0,704	1,321	0,437	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,596	1,470	2,030	0,711	1,334	0,441	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,648	1,499	2,070	0,725	1,361	0,450	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038

Continuación del apéndice 4.

Re						Rugosidad relativa					
pvc 1/2"	pvc 1"	hg1/2"	hg 1"	pirex 1"	hg 1 1/4"	pvc 1/2"	pvc 1"	hg1/2"	hg 1"	pirex 1"	hg 1 1/4"
0	0	0	0	0	0	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989
4781	3598	4228	2502	3428	1971	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989
4834	3637	4274	2530	3466	1993	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989
12351	9293	10921	6463	8855	5091	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989
12544	9439	11092	6564	8993	5171	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989
13055	9823	11543	6831	9359	5382	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989
18422	13862	16289	9640	13208	7594	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989
18608	14001	16453	9737	13340	7671	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989
18636	14023	16478	9752	13361	7683	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989
18665	14044	16504	9768	13382	7695	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989
19065	14345	16857	9976	13668	7859	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989
32080	24138	28365	16787	22999	13224	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989
36454	27429	32233	19076	26135	15028	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989
37302	28067	32982	19520	26743	15377	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989
37949	28554	33554	19859	27207	15644	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989
38009	28599	33608	19890	27250	15669	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989
38743	29152	34257	20274	27776	15971	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989
40505	30477	35814	21196	29039	16697	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989
44473	33462	39323	23272	31884	18333	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989
44804	33712	39616	23446	32121	18470	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989
45481	34221	40215	23800	32607	18749	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989
46537	35016	41148	24353	33364	19184	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989
46992	35358	41550	24590	33690	19372	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989
47928	36062	42378	25080	34361	19757	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989

Continuación del apéndice 4.

Fanning						Longitud de tubería (m)						Pérdida de carga por fricción en tubería (m)						hf
pvc 1/2"	pvc 1"	hg 1/2"	hg 1"	pirex 1"	hg 1 1/4"	pvc 1/2"	pvc 1"	hg 1/2"	hg 1"	pirex 1"	hg 1 1/4"	pvc 1/2"	pvc 1"	hg 1/2"	hg 1"	pirex 1"	hg 1 1/4"	Total
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,038	0,041	0,039	0,045	0,041	0,047	0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,007	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,011
0,038	0,041	0,039	0,045	0,041	0,047	0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,007	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,011
0,030	0,032	0,031	0,035	0,033	0,037	0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,040	0,002	0,002	0,000	0,013	0,000	0,058
0,030	0,032	0,031	0,035	0,032	0,037	0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,041	0,002	0,003	0,001	0,014	0,000	0,060
0,030	0,032	0,031	0,035	0,032	0,037	0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,044	0,002	0,003	0,001	0,015	0,000	0,064
0,027	0,029	0,028	0,032	0,030	0,034	0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,082	0,003	0,005	0,001	0,028	0,000	0,120
0,027	0,029	0,028	0,032	0,029	0,034	0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,084	0,004	0,005	0,001	0,028	0,000	0,122
0,027	0,029	0,028	0,032	0,029	0,034	0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,084	0,004	0,005	0,001	0,028	0,000	0,122
0,027	0,029	0,028	0,032	0,029	0,034	0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,084	0,004	0,005	0,001	0,028	0,000	0,122
0,027	0,029	0,028	0,032	0,029	0,034	0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,087	0,004	0,005	0,001	0,029	0,000	0,127
0,024	0,025	0,024	0,028	0,026	0,030	0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,223	0,009	0,014	0,003	0,075	0,000	0,324
0,023	0,025	0,024	0,027	0,025	0,029	0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,281	0,012	0,017	0,003	0,095	0,000	0,408
0,023	0,024	0,023	0,027	0,025	0,028	0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,292	0,012	0,018	0,004	0,099	0,000	0,426
0,023	0,024	0,023	0,027	0,025	0,028	0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,302	0,013	0,019	0,004	0,102	0,000	0,439
0,023	0,024	0,023	0,027	0,025	0,028	0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,303	0,013	0,019	0,004	0,102	0,000	0,440
0,023	0,024	0,023	0,027	0,025	0,028	0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,313	0,013	0,019	0,004	0,106	0,000	0,456
0,022	0,024	0,023	0,026	0,024	0,028	0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,339	0,014	0,021	0,004	0,114	0,001	0,494
0,022	0,023	0,022	0,026	0,024	0,027	0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,401	0,017	0,025	0,005	0,135	0,001	0,584
0,022	0,023	0,022	0,026	0,024	0,027	0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,407	0,017	0,025	0,005	0,137	0,001	0,592
0,022	0,023	0,022	0,025	0,024	0,027	0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,418	0,018	0,026	0,005	0,141	0,001	0,608
0,022	0,023	0,022	0,025	0,023	0,027	0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,436	0,019	0,027	0,005	0,147	0,001	0,634
0,021	0,023	0,022	0,025	0,023	0,027	0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,443	0,019	0,027	0,005	0,150	0,001	0,645
0,021	0,023	0,022	0,025	0,023	0,027	0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,459	0,020	0,028	0,006	0,155	0,001	0,668

Continuación del apéndice 4.

Pérdida por accesorios (m)								
Codos 90 1/2"	Codos 90 1"	reduc--1/2"	reduc--hg 1"	hg expa-1 1/4"	Válvula 1/2	hg expa-1 "	Tanque	Bomba
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	0,000	0,001	0,000	0,000	0,036	0,000	0,002	0,000
0,010	0,000	0,001	0,000	0,000	0,036	0,000	0,002	0,000
0,066	0,001	0,008	0,000	0,000	0,237	0,001	0,012	0,000
0,069	0,001	0,009	0,000	0,000	0,245	0,001	0,012	0,000
0,074	0,001	0,009	0,000	0,000	0,265	0,001	0,013	0,000
0,148	0,002	0,018	0,000	0,001	0,528	0,002	0,026	0,001
0,151	0,002	0,019	0,000	0,001	0,539	0,002	0,027	0,001
0,151	0,002	0,019	0,000	0,001	0,540	0,002	0,027	0,001
0,152	0,002	0,019	0,000	0,001	0,542	0,002	0,027	0,001
0,158	0,002	0,020	0,000	0,001	0,565	0,002	0,028	0,001
0,448	0,005	0,056	0,001	0,003	1,601	0,007	0,080	0,002
0,579	0,006	0,072	0,001	0,004	2,067	0,009	0,103	0,003
0,606	0,006	0,076	0,001	0,004	2,165	0,009	0,108	0,003
0,627	0,007	0,078	0,001	0,004	2,240	0,009	0,112	0,003
0,629	0,007	0,078	0,001	0,004	2,248	0,009	0,112	0,003
0,654	0,007	0,081	0,001	0,004	2,335	0,010	0,117	0,004
0,715	0,008	0,089	0,001	0,004	2,552	0,011	0,128	0,004
0,862	0,009	0,107	0,001	0,005	3,077	0,013	0,154	0,005
0,874	0,009	0,109	0,001	0,006	3,123	0,013	0,156	0,005
0,901	0,010	0,112	0,001	0,006	3,218	0,014	0,161	0,005
0,943	0,010	0,118	0,002	0,006	3,369	0,014	0,168	0,005
0,962	0,010	0,120	0,002	0,006	3,435	0,014	0,172	0,005
1,001	0,011	0,125	0,002	0,006	3,574	0,015	0,179	0,005

Continuación del apéndice 4.

Pérdida de válvula (abertura)				Primer término	NSPHD	F. seguridad	NSPHR
% de apertura	Cv	hv (PSI)	hv (m.c.a)	(m)	(m)	(m)	(m)
0,000	0,114	0,000	0,000	8,068	8,068	0,108	7,960
8,340	0,557	2,004	1,403	8,068	6,616	0,137	6,480
8,432	0,561	2,024	1,417	8,068	6,601	0,137	6,465
21,543	1,085	3,530	2,471	8,068	5,270	0,137	5,136
21,879	1,106	3,507	2,455	8,068	5,277	0,137	5,142
22,770	1,163	3,429	2,401	8,068	5,303	0,137	5,168
32,132	2,163	1,975	1,382	8,068	5,959	0,839	5,125
32,455	2,214	1,924	1,347	8,068	5,980	0,839	5,146
32,506	2,222	1,916	1,341	8,068	5,983	0,839	5,149
32,556	2,230	1,908	1,336	8,068	5,987	0,839	5,152
33,253	2,344	1,801	1,261	8,068	6,029	0,839	5,195
55,953	10,625	0,248	0,174	8,068	5,692	1,190	4,514
63,583	16,111	0,139	0,098	8,068	5,126	1,716	3,426
65,062	17,374	0,126	0,088	8,068	5,002	1,716	3,302
66,191	18,385	0,116	0,081	8,068	4,904	1,716	3,205
66,295	18,481	0,115	0,081	8,068	4,895	1,716	3,196
67,576	19,683	0,106	0,074	8,068	4,781	1,716	3,083
70,648	22,791	0,086	0,060	8,068	4,496	2,594	1,922
77,569	31,037	0,056	0,039	8,068	3,796	2,067	1,752
78,147	31,808	0,054	0,038	8,068	3,734	2,594	1,164
79,329	33,426	0,050	0,035	8,068	3,605	2,594	1,036
81,170	36,060	0,045	0,032	8,068	3,401	2,594	0,833
81,963	37,237	0,043	0,030	8,068	3,311	2,594	0,744
83,595	39,745	0,040	0,028	8,068	3,124	2,594	0,557

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Datos calculados para la temperatura de operación de
40 °C**

Temperatura (°C)	Presión de vapor (Pa)	Densidad kg/m ³	Presión atmosférica (m.c.a)	Presión entrada (m.c.a)	Presión salida (m.c.a)	Caudal L/min
40	7375	992,30	84210	0,450	8,590	0,000
40	7375	992,30	84210	0,829	7,829	4,044
40	7375	992,30	84210	0,829	7,829	4,056
40	7375	992,30	84210	0,829	7,829	4,056
40	7375	992,30	84210	0,829	7,829	4,111
40	7375	992,30	84210	1,529	9,229	12,162
40	7375	992,30	84210	1,529	9,229	12,463
40	7375	992,30	84210	1,529	9,229	12,474
40	7375	992,30	84210	1,529	9,229	12,474
40	7375	992,30	84210	1,529	9,229	12,683
40	7375	992,30	84210	2,404	9,929	20,238
40	7375	992,30	84210	2,404	9,929	22,102
40	7375	992,30	84210	2,404	9,929	22,265
40	7375	992,30	84210	2,404	9,929	22,598
40	7375	992,30	84210	2,404	9,929	22,941
40	7375	992,30	84210	2,754	11,329	23,997
40	7375	992,30	84210	1,879	9,929	24,384
40	7375	992,30	84210	1,879	9,929	24,384
40	7375	992,30	84210	2,754	11,329	24,783
40	7375	992,30	84210	1,879	9,929	24,783
40	7375	992,30	84210	2,754	11,329	25,624
40	7375	992,30	84210	1,879	9,929	25,624
40	7375	992,30	84210	1,879	9,929	25,624
40	7375	992,30	84210	2,754	11,329	26,523
40	7375	992,30	84210	1,879	9,929	26,523
40	7375	992,30	84210	3,244	10,629	26,852
40	7375	992,30	84210	2,754	11,329	26,996
40	7375	992,30	84210	3,279	10,279	27,338
40	7375	992,30	84210	3,244	10,629	27,338
40	7375	992,30	84210	3,244	10,629	27,338
40	7375	992,30	84210	3,244	10,629	27,790
40	7375	992,30	84210	3,279	10,279	27,841
40	7375	992,30	84210	3,244	10,629	27,841
40	7375	992,30	84210	3,279	10,279	27,893
40	7375	992,30	84210	2,754	11,329	27,996
40	7375	992,30	84210	3,279	10,279	28,311
40	7375	992,30	84210	3,279	10,279	28,364
40	7375	992,30	84210	2,754	11,329	29,073

Continuación del apéndice 5.

Velocidad (m/s)						Diámetros internos (m)					
pvc 1/2"	pvc 1"	hg1/2"	hg 1"	pirex 1"	hg 1 1/4"	pvc 1/2"	pvc 1"	hg1/2"	hg 1"	pirex 1"	hg 1 1/4"
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
0,357	0,202	0,279	0,098	0,184	0,061	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
0,358	0,203	0,280	0,098	0,184	0,061	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
0,358	0,203	0,280	0,098	0,184	0,061	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
0,363	0,206	0,284	0,099	0,187	0,062	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
1,074	0,608	0,840	0,294	0,552	0,183	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
1,101	0,623	0,861	0,301	0,566	0,187	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
1,102	0,624	0,861	0,302	0,566	0,187	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
1,102	0,624	0,861	0,302	0,566	0,187	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
1,120	0,634	0,876	0,307	0,576	0,190	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
1,788	1,012	1,398	0,490	0,919	0,304	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
1,952	1,105	1,526	0,535	1,003	0,332	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
1,967	1,113	1,538	0,539	1,011	0,334	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
1,996	1,130	1,560	0,547	1,026	0,339	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,026	1,147	1,584	0,555	1,041	0,344	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,120	1,200	1,657	0,580	1,089	0,360	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,154	1,219	1,684	0,590	1,107	0,366	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,154	1,219	1,684	0,590	1,107	0,366	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,189	1,239	1,711	0,599	1,125	0,372	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,189	1,239	1,711	0,599	1,125	0,372	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,263	1,281	1,769	0,620	1,163	0,385	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,263	1,281	1,769	0,620	1,163	0,385	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,263	1,281	1,769	0,620	1,163	0,385	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,263	1,281	1,769	0,620	1,163	0,385	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,343	1,326	1,832	0,642	1,204	0,398	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,343	1,326	1,832	0,642	1,204	0,398	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,372	1,343	1,854	0,649	1,219	0,403	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,385	1,350	1,864	0,653	1,226	0,405	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,415	1,367	1,888	0,661	1,241	0,410	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,415	1,367	1,888	0,661	1,241	0,410	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,415	1,367	1,888	0,661	1,241	0,410	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,455	1,390	1,919	0,672	1,262	0,417	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,459	1,392	1,923	0,673	1,264	0,418	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,459	1,392	1,923	0,673	1,264	0,418	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,464	1,395	1,926	0,675	1,266	0,419	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,473	1,400	1,933	0,677	1,271	0,420	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,501	1,416	1,955	0,685	1,285	0,425	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,505	1,418	1,959	0,686	1,288	0,426	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038
2,568	1,454	2,008	0,703	1,320	0,436	0,016	0,021	0,018	0,030	0,022	0,038

Continuación del apéndice 5.

Re						Rugosidad relativa						Fanning					
pvc 1/2"	pvc 1"	hg1/2"	hg 1"	pirex 1"	hg 1 1/4"	pvc 1/2"	pvc 1"	hg1/2"	hg 1"	pirex 1"	hg 1 1/4"	pvc 1/2"	pvc 1"	hg1/2"	hg 1"	pirex 1"	hg 1 1/4"
0	0	0	0	0	0	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8414	6331	7440	4403	6032	3469	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,033	0,035	0,034	0,039	0,036	0,041
8439	6350	7462	4416	6050	3479	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,033	0,035	0,034	0,039	0,036	0,041
8439	6350	7462	4416	6050	3479	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,033	0,035	0,034	0,039	0,036	0,041
8554	6436	7563	4476	6132	3526	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,033	0,035	0,034	0,039	0,036	0,041
25303	19039	22373	13241	18141	10431	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,025	0,027	0,026	0,029	0,027	0,031
25929	19510	22927	13569	18589	10689	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,025	0,027	0,026	0,029	0,027	0,031
25951	19526	22945	13580	18605	10698	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,025	0,027	0,026	0,029	0,027	0,031
25951	19526	22945	13580	18605	10698	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,025	0,027	0,026	0,029	0,027	0,031
26386	19854	23330	13808	18917	10877	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,025	0,027	0,026	0,029	0,027	0,031
42104	31681	37229	22033	30186	17357	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,022	0,024	0,023	0,026	0,024	0,028
45983	34599	40658	24062	32966	18956	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,022	0,023	0,022	0,025	0,023	0,027
46321	34853	40957	24240	33209	19095	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,022	0,023	0,022	0,025	0,023	0,027
47014	35374	41569	24602	33705	19381	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,021	0,023	0,022	0,025	0,023	0,027
47727	35911	42200	24975	34217	19675	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,021	0,023	0,022	0,025	0,023	0,027
49924	37564	44143	26125	35792	20580	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,021	0,023	0,022	0,025	0,023	0,026
50729	38170	44855	26546	36369	20912	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,021	0,023	0,022	0,025	0,023	0,026
50729	38170	44855	26546	36369	20912	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,021	0,023	0,022	0,025	0,023	0,026
51561	38796	45590	26981	36965	21255	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,021	0,023	0,022	0,025	0,023	0,026
51561	38796	45590	26981	36965	21255	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,021	0,023	0,022	0,025	0,023	0,026
53309	40111	47135	27896	38218	21976	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,021	0,022	0,021	0,024	0,023	0,026
53309	40111	47135	27896	38218	21976	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,021	0,022	0,021	0,024	0,023	0,026
53309	40111	47135	27896	38218	21976	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,021	0,022	0,021	0,024	0,023	0,026
55179	41518	48789	28875	39559	22747	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,021	0,022	0,021	0,024	0,022	0,026
55179	41518	48789	28875	39559	22747	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,021	0,022	0,021	0,024	0,022	0,026
55865	42034	49396	29234	40051	23029	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,021	0,022	0,021	0,024	0,022	0,026
56164	42260	49660	29391	40266	23153	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,021	0,022	0,021	0,024	0,022	0,026
56875	42795	50289	29763	40776	23446	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,020	0,022	0,021	0,024	0,022	0,026
56875	42795	50289	29763	40776	23446	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,020	0,022	0,021	0,024	0,022	0,026
56875	42795	50289	29763	40776	23446	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,020	0,022	0,021	0,024	0,022	0,026
57816	43503	51121	30255	41450	23834	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,020	0,022	0,021	0,024	0,022	0,025
57923	43583	51215	30311	41526	23878	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,020	0,022	0,021	0,024	0,022	0,025
57923	43583	51215	30311	41526	23878	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,020	0,022	0,021	0,024	0,022	0,025
58030	43663	51310	30367	41603	23922	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,020	0,022	0,021	0,024	0,022	0,025
58245	43825	51500	30479	41757	24010	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,020	0,022	0,021	0,024	0,022	0,025
58899	44317	52078	30822	42226	24280	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,020	0,022	0,021	0,024	0,022	0,025
59009	44400	52176	30879	42306	24326	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,020	0,022	0,021	0,024	0,022	0,025
60485	45510	53480	31651	43363	24934	0,097	0,073	8,557	5,064	0,694	3,989	0,020	0,022	0,021	0,024	0,022	0,025

Continuación del apéndice 5.

Longitud de tubería (m)						Pérdida de carga por fricción en tubería (m)						hf
pvc 1/2"	pvc 1"	hg1/2"	hg 1"	pirex 1"	hg 1 1/4"	pvc 1/2"	pvc 1"	hg1/2"	hg 1"	pirex 1"	hg 1 1/4"	Total
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,012	0,001	0,001	0,000	0,004	0,000	0,018
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,013	0,001	0,001	0,000	0,004	0,000	0,018
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,013	0,001	0,001	0,000	0,004	0,000	0,018
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,013	0,001	0,001	0,000	0,004	0,000	0,019
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,091	0,004	0,006	0,001	0,031	0,000	0,132
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,095	0,004	0,006	0,001	0,032	0,000	0,138
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,095	0,004	0,006	0,001	0,032	0,000	0,138
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,095	0,004	0,006	0,001	0,032	0,000	0,138
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,098	0,004	0,006	0,001	0,033	0,000	0,142
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,226	0,010	0,014	0,003	0,076	0,000	0,330
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,265	0,011	0,016	0,003	0,090	0,000	0,386
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,269	0,011	0,017	0,003	0,091	0,000	0,391
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,276	0,012	0,017	0,003	0,093	0,000	0,402
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,284	0,012	0,017	0,004	0,096	0,000	0,413
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,308	0,013	0,019	0,004	0,104	0,000	0,448
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,317	0,013	0,019	0,004	0,107	0,001	0,461
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,317	0,013	0,019	0,004	0,107	0,001	0,461
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,326	0,014	0,020	0,004	0,110	0,001	0,475
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,326	0,014	0,020	0,004	0,110	0,001	0,475
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,346	0,015	0,021	0,004	0,117	0,001	0,504
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,346	0,015	0,021	0,004	0,117	0,001	0,504
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,346	0,015	0,021	0,004	0,117	0,001	0,504
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,346	0,015	0,021	0,004	0,117	0,001	0,504
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,368	0,016	0,023	0,005	0,124	0,001	0,536
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,368	0,016	0,023	0,005	0,124	0,001	0,536
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,377	0,016	0,023	0,005	0,127	0,001	0,548
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,380	0,016	0,023	0,005	0,128	0,001	0,553
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,389	0,017	0,024	0,005	0,131	0,001	0,566
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,389	0,017	0,024	0,005	0,131	0,001	0,566
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,389	0,017	0,024	0,005	0,131	0,001	0,566
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,401	0,017	0,025	0,005	0,135	0,001	0,583
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,402	0,017	0,025	0,005	0,136	0,001	0,585
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,402	0,017	0,025	0,005	0,136	0,001	0,585
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,403	0,017	0,025	0,005	0,136	0,001	0,587
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,406	0,017	0,025	0,005	0,137	0,001	0,591
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,414	0,018	0,025	0,005	0,140	0,001	0,603
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,416	0,018	0,026	0,005	0,140	0,001	0,605
0,900	0,150	0,100	0,250	1,500	0,100	0,435	0,018	0,027	0,005	0,147	0,001	0,632

Continuación del apéndice 5.

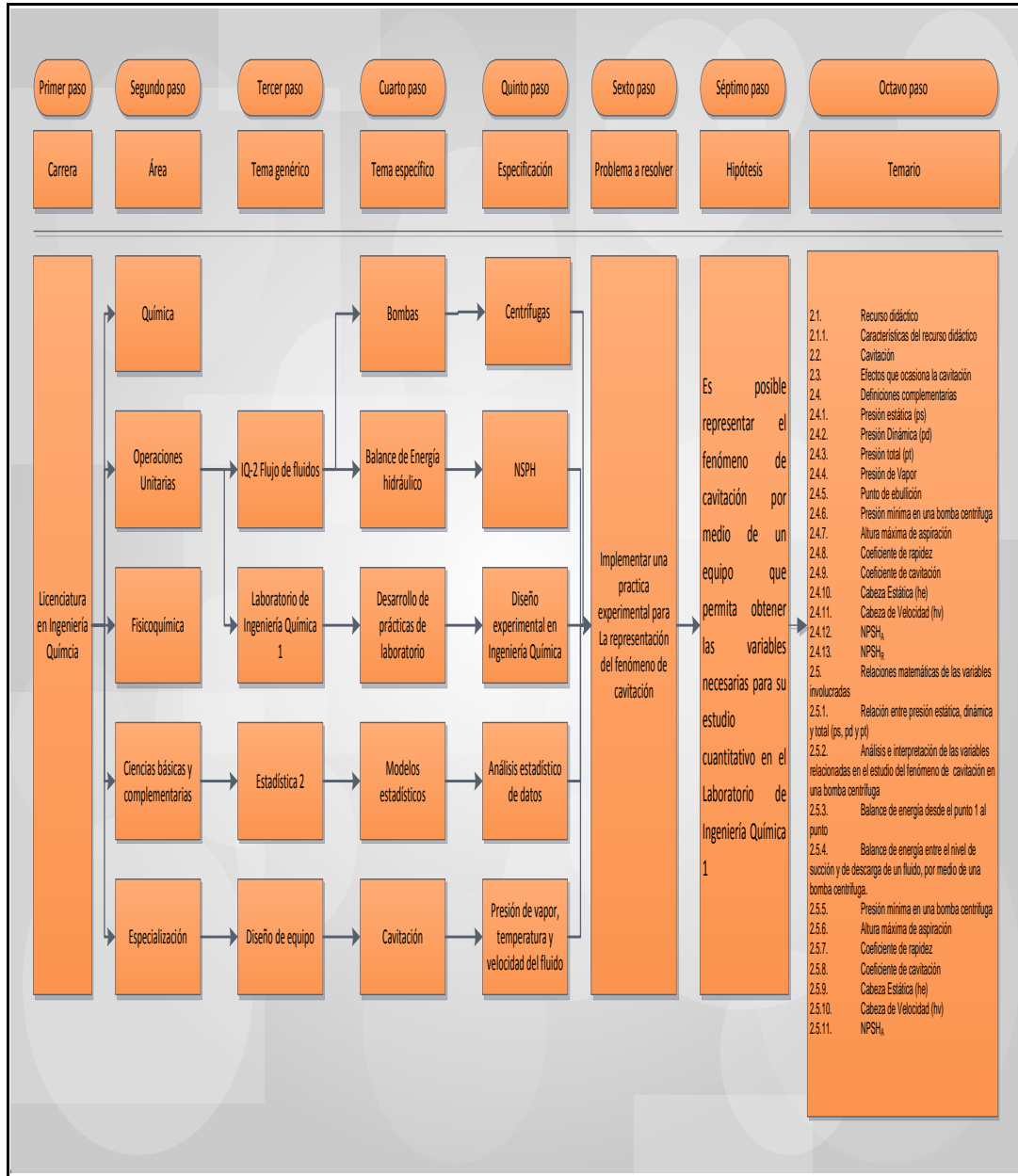
Pérdida por accesorios(m)								
Codos 90 1/2"	Codos 90 1"	reduc--1/2"	reduc--hg 1"	hg expa-1 1/4"	Válvula 1/2	hg expa-1 "	Tanque	Bomba
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,018	0,000	0,002	0,000	0,000	0,065	0,000	0,003	0,000
0,018	0,000	0,002	0,000	0,000	0,065	0,000	0,003	0,000
0,018	0,000	0,002	0,000	0,000	0,065	0,000	0,003	0,000
0,019	0,000	0,002	0,000	0,000	0,067	0,000	0,003	0,000
0,165	0,002	0,021	0,000	0,001	0,588	0,002	0,029	0,001
0,173	0,002	0,022	0,000	0,001	0,618	0,003	0,031	0,001
0,173	0,002	0,022	0,000	0,001	0,619	0,003	0,031	0,001
0,173	0,002	0,022	0,000	0,001	0,619	0,003	0,031	0,001
0,179	0,002	0,022	0,000	0,001	0,640	0,003	0,032	0,001
0,456	0,005	0,057	0,001	0,003	1,629	0,007	0,081	0,002
0,544	0,006	0,068	0,001	0,003	1,943	0,008	0,097	0,003
0,552	0,006	0,069	0,001	0,003	1,971	0,008	0,099	0,003
0,569	0,006	0,071	0,001	0,004	2,031	0,009	0,102	0,003
0,586	0,006	0,073	0,001	0,004	2,093	0,009	0,105	0,003
0,641	0,007	0,080	0,001	0,004	2,290	0,010	0,114	0,003
0,662	0,007	0,082	0,001	0,004	2,364	0,010	0,118	0,004
0,662	0,007	0,082	0,001	0,004	2,364	0,010	0,118	0,004
0,684	0,007	0,085	0,001	0,004	2,442	0,010	0,122	0,004
0,684	0,007	0,085	0,001	0,004	2,442	0,010	0,122	0,004
0,731	0,008	0,091	0,001	0,005	2,611	0,011	0,131	0,004
0,731	0,008	0,091	0,001	0,005	2,611	0,011	0,131	0,004
0,731	0,008	0,091	0,001	0,005	2,611	0,011	0,131	0,004
0,731	0,008	0,091	0,001	0,005	2,611	0,011	0,131	0,004
0,783	0,008	0,098	0,001	0,005	2,797	0,012	0,140	0,004
0,783	0,008	0,098	0,001	0,005	2,797	0,012	0,140	0,004
0,803	0,009	0,100	0,001	0,005	2,867	0,012	0,143	0,004
0,811	0,009	0,101	0,001	0,005	2,898	0,012	0,145	0,004
0,832	0,009	0,104	0,001	0,005	2,972	0,012	0,149	0,004
0,832	0,009	0,104	0,001	0,005	2,972	0,012	0,149	0,004
0,832	0,009	0,104	0,001	0,005	2,972	0,012	0,149	0,004
0,860	0,009	0,107	0,001	0,005	3,071	0,013	0,154	0,005
0,863	0,009	0,108	0,001	0,005	3,082	0,013	0,154	0,005
0,863	0,009	0,108	0,001	0,005	3,082	0,013	0,154	0,005
0,866	0,009	0,108	0,001	0,005	3,094	0,013	0,155	0,005
0,873	0,009	0,109	0,001	0,005	3,117	0,013	0,156	0,005
0,892	0,010	0,111	0,001	0,006	3,187	0,013	0,159	0,005
0,896	0,010	0,112	0,001	0,006	3,199	0,013	0,160	0,005
0,941	0,010	0,117	0,002	0,006	3,361	0,014	0,168	0,005

Continuación del apéndice 5.

Pérdida de válvula (abertura)				Primer término	NSPHD	F. seguridad	NSPHR
% de abertura	Cv	hv (PSI)	hv (m.c.a)	(m)	(m)	(m)	(m)
0,000	0,114	0,000	0,000	7,693	7,693	0,034	7,659
13,911	0,747	2,041	1,429	7,693	6,156	0,077	6,080
13,952	0,748	2,046	1,432	7,693	6,153	0,077	6,076
13,952	0,748	2,046	1,432	7,693	6,153	0,077	6,076
14,142	0,755	2,066	1,446	7,693	6,136	0,077	6,059
41,834	4,323	0,551	0,386	7,693	6,366	0,782	5,588
42,869	4,643	0,502	0,351	7,693	6,355	0,782	5,577
42,904	4,655	0,500	0,350	7,693	6,354	0,782	5,576
42,904	4,655	0,500	0,350	7,693	6,354	0,782	5,576
43,624	4,889	0,468	0,328	7,693	6,343	0,782	5,565
69,612	21,706	0,061	0,042	7,693	5,080	1,664	3,429
76,023	29,039	0,040	0,028	7,693	4,606	1,664	2,957
76,583	29,752	0,039	0,027	7,693	4,562	1,664	2,913
77,728	31,248	0,036	0,025	7,693	4,472	1,664	2,823
78,907	32,843	0,034	0,024	7,693	4,377	1,664	2,729
82,540	38,110	0,028	0,019	7,693	4,076	2,017	2,076
83,871	40,179	0,026	0,018	7,693	3,962	1,135	2,844
83,871	40,179	0,026	0,018	7,693	3,962	1,135	2,844
85,246	42,396	0,024	0,017	7,693	3,842	2,017	1,843
85,246	42,396	0,024	0,017	7,693	3,842	1,135	2,725
88,136	47,329	0,020	0,014	7,693	3,583	2,017	1,586
88,136	47,329	0,020	0,014	7,693	3,583	1,135	2,468
88,136	47,329	0,020	0,014	7,693	3,583	1,135	2,468
88,136	47,329	0,020	0,014	7,693	3,583	1,135	2,468
91,228	53,030	0,017	0,012	7,693	3,296	2,017	1,301
91,228	53,030	0,017	0,012	7,693	3,296	1,135	2,182
92,362	55,234	0,016	0,012	7,693	3,189	2,510	0,700
92,857	56,215	0,016	0,011	7,693	3,141	2,017	1,146
94,033	58,593	0,015	0,011	7,693	3,028	2,545	0,505
94,033	58,593	0,015	0,011	7,693	3,028	2,510	0,540
94,033	58,593	0,015	0,011	7,693	3,028	2,510	0,540
95,588	61,845	0,014	0,010	7,693	2,875	2,510	0,388
95,764	62,220	0,014	0,010	7,693	2,858	2,545	0,335
95,764	62,220	0,014	0,010	7,693	2,858	2,510	0,371
95,941	62,599	0,014	0,010	7,693	2,840	2,545	0,318
96,296	63,365	0,014	0,010	7,693	2,805	2,017	0,812
97,378	65,737	0,013	0,009	7,693	2,696	2,545	0,175
97,561	66,143	0,013	0,009	7,693	2,678	2,545	0,156
100,000	71,734	0,011	0,008	7,693	2,429	2,017	0,437

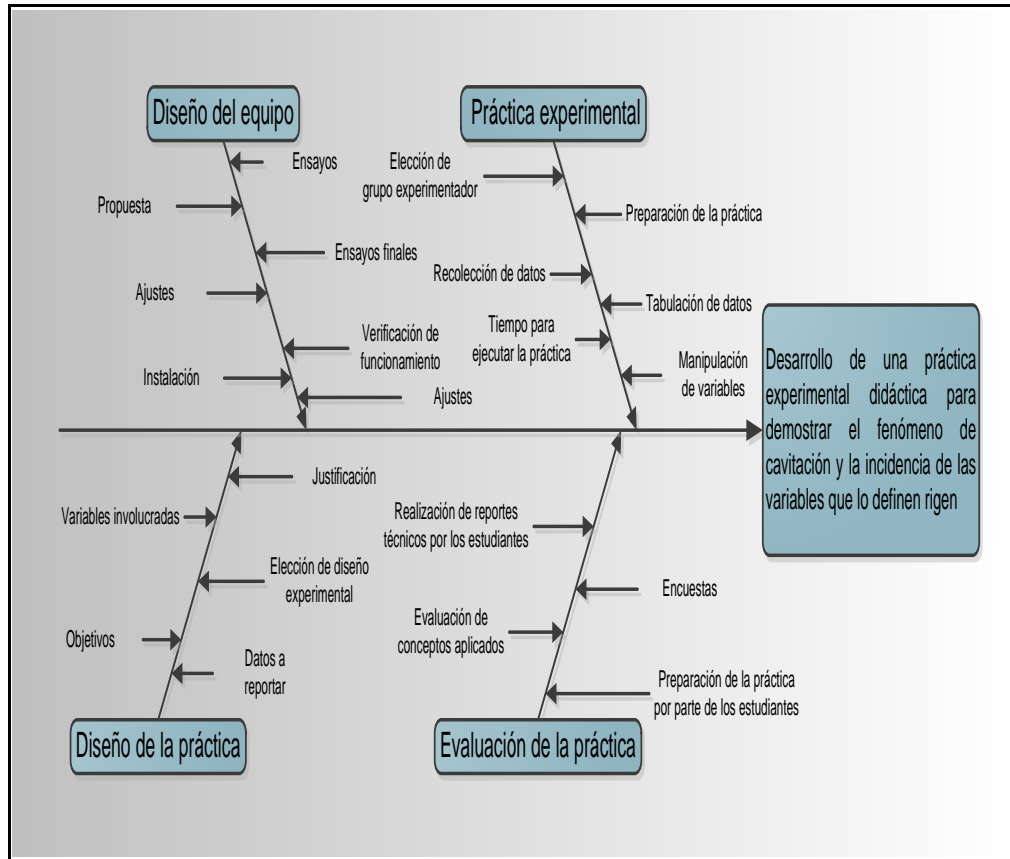
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

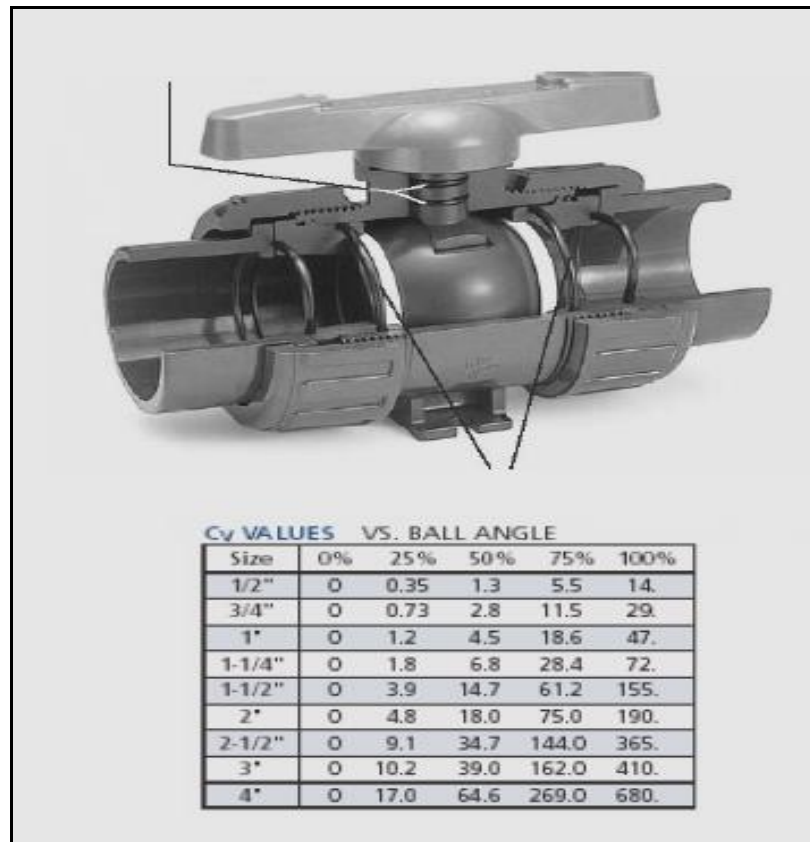
Apéndice 7. Diagrama de Ishikawa o árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

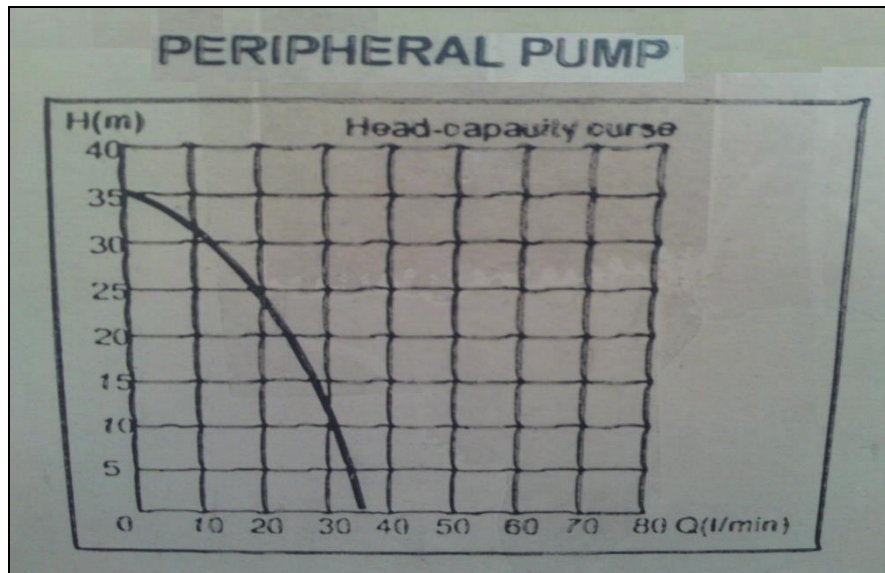
ANEXOS

Anexo 1. Coeficiente de capacidad para una válvula de bola



Fuente: Desconocido. Flujo en conductos cerrados. 12. p.


Anexo 2. **Curva característica de la bomba dada por el fabricante**



Fuente: QB60 RIETI.


Anexo 3. Coeficientes de pérdida de carga para accesorios

Accesorios
 La sección transversal de referencia para la velocidad del flujo se indican siempre por



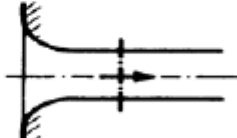
Entrada, también se aplica a la salida de un recipiente a una tubería

aristas vivas



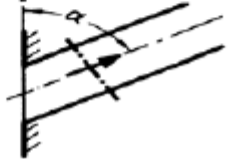
muy afilada $\zeta = 0,5$
 achaflanado leve $\zeta = 0,25$
 totalmente achaflanado $\zeta = 0,2$

redondeada



ligeramente $\zeta = 0,06$ a $0,05$
 normal $\zeta = 0,05$


aristas vivas con ángulo α



α	45°	60°	75°
ζ	0,8	0,7	0,6


Continuación del anexo 3.


aristas vivas salientes



muy afiladas $\zeta = 3$
 achaflanado leve $\zeta = 0,6$

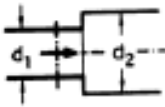
Aspiración de la bomba

Montaje de forma campana  $\zeta = 0,05$

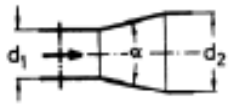
Montaje forma cónica  $\zeta = 0,20$

Salida, pérdidas en la salida $\zeta = 1$
 La velocidad del flujo en la sección transversal de salida es el parámetro determinante

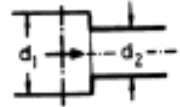
Cambios de sección



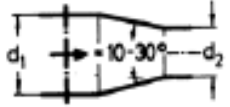
d_1/d_2	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
ζ	0,56	0,46	0,24	0,13	0,04



d_1/d_2	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	
ζ para	$\alpha=8^\circ$	0,12	0,09	0,07	0,04	0,02
	$\alpha=16^\circ$	0,19	0,14	0,09	0,05	0,02
	$\alpha=25^\circ$	0,33	0,25	0,16	0,08	0,03




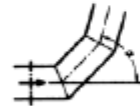
d_1/d_2	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
ζ	0,10	0,22	0,29	0,33	0,35



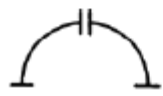
d_1/d_2	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
ζ	0,02	0,05	0,10	0,17	0,26

Continuación del anexo 3.

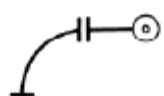
Codos curvados	α	45°		60°		90°	
	superficie	lisa	rugosa	lisa	rugosa	lisa	rugosa
	ζ para R=d	0,14	0,34	0,19	0,46	0,21	0,51
	R=2d	0,09	0,19	0,12	0,26	0,14	0,30
	R≥5d	0,08	0,16	0,10	0,20	0,10	0,20

fabricados	α	45°	60°	90°
	Número de costuras de soldadura	2	3	3
	ζ	0,15	0,2	0,25


Codos de 90° en serie



2 · ζ_{90°



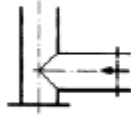
3 · ζ_{90°



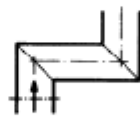
4 · ζ_{90°

Codos a inglete	α	45°		60°		90°	
superficie	lisa	rugosa	lisa	rugosa	lisa	rugosa	
ζ	0,25	0,35	0,50	0,70	1,15	1,30	

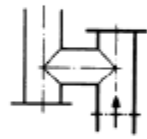
Codos de 90° combinados



$\zeta = 2,5$



$\zeta = 3$

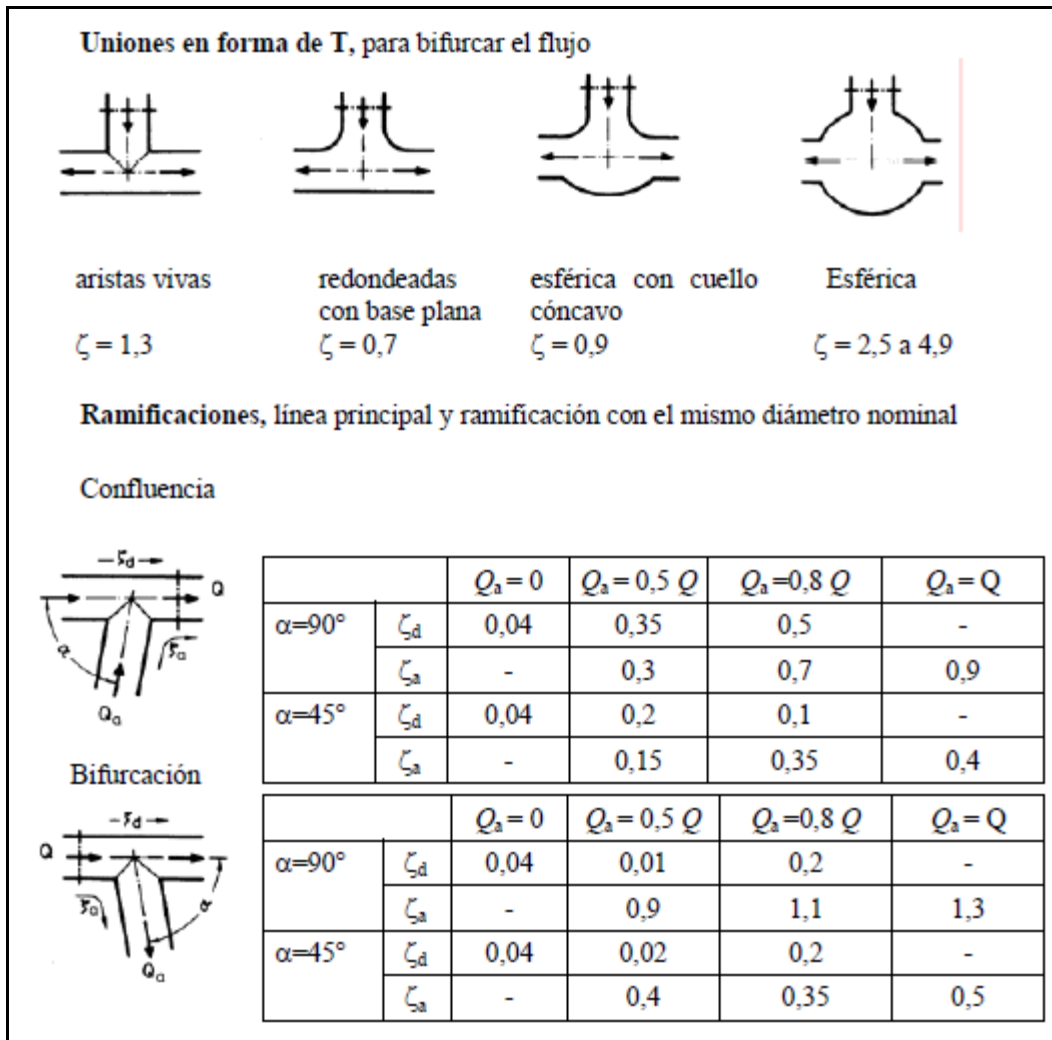


$\zeta = 5$

Juntas de expansión

Juntas de expansión, con / sin tubo guía	$\zeta = 0,3 / 2,0$
Junta de expansión en lira (plana)	$\zeta = 0,7$
Junta de expansión en lira (fuelle)	$\zeta = 1,4$

Continuación del anexo 3.



Fuente: STERLING FLUID SYSTEMS GROUP. p. 188 -191.

Anexo 4. Constantes para la ecuación de Antoine

ECUACIÓN DE ANTOINE*

$$\log_{10} P^* = A - \frac{B}{T + C}$$

CONSTANTES PARA LA ECUACIÓN DE ANTOINE

$\log_{10} P^* = A - \frac{B}{T + C}$ P^* en mm Hg T en °C

Substancia	Fórmula	Rango. °C	A	B	C
Acetaldehído	C ₂ H ₄ O	-45 a +70	6.81089	992.0	230
Acido acético	C ₂ H ₄ O ₂	0 a +36	7.80307	1651.2	225
		+36 a +170	7.18807	1416.7	211
Acetona	C ₃ H ₆ O	----	7.02447	1161.0	224
Amoniaco	NH ₃	-83 a +60	7.55466	1002.711	247.885
Benceno	C ₆ H ₆	----	6.90565	1211.033	220.790
Tetracloruro de carbono	CCl ₄	----	6.9339	1242.43	230.0
Clorobenceno	C ₆ H ₅ Cl	0 a +42	7.10690	1500.0	224.0
		+42 a +230	6.94504	1413.12	216.0
Cloroformo	CHCl ₃	-30 a +150	6.90328	1163.03	227.4
Ciclohexano	C ₆ H ₁₂	-50 a +200	6.84498	1203.526	222.863
	C ₄ H ₈ O ₂	-20 a +150	7.09808	1238.71	217.0
Acetato de etilo	C ₂ H ₆ O	----	8.04494	1554.3	222.65
Alcohol etílico	C ₈ H ₁₀	----	6.95719	1424.255	213.206
Etilbenceno	C ₇ H ₁₆	----	6.90240	1268.115	216.900
n-Heptano	C ₆ H ₁₄	----	6.87776	1171.530	224.366
n-Hexano	CH ₄ O	-20 a +140	7.87863	1473.11	230.0
Alcohol metílico	C ₄ H ₈ O	----	6.97421	1209.6	216.0
Metil etil cetona	C ₅ H ₁₂	----	6.85221	1064.63	232.000
n-Pentano	C ₅ H ₁₂	----	6.78967	1020.012	233.097
Isopentano	C ₈ H ₈	----	6.92409	1420.0	206.0
Estireno	C ₇ H ₈	----	6.95334	1343.943	219.377
Tolueno	H ₂ O	0 a 60	8.10765	1750.286	235.0
Agua		60 a 150	7.96681	1668.21	228.0

Fuente: PATIÑO OLIVARES, Armando. Balances de masa y energía. Apéndice 6.7

