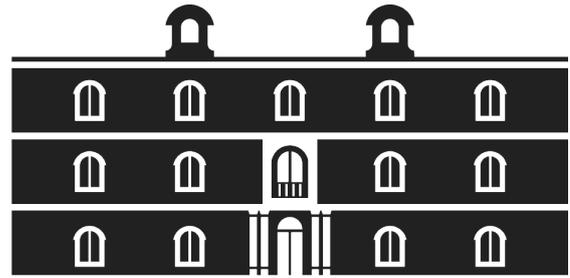


Universidad
Politécnica
de Cartagena



industriales
etsii UPCT

Estudio experimental de la cavitación en tubos de Venturi

Titulación: Grado en Ingeniería en
Tecnologías Industriales
Alumno/a: Antonio Zabala Jorquera
Director/a/s: Antonio Viedma Robles

Septiembre de 2014

Estudio experimental de la cavitación en tubos de Venturi

RESUMEN

El TFG abordará el estudio de la cavitación en un tubo de Venturi de forma experimental usando para ello una instalación de laboratorio, la cual habrá que poner en funcionamiento y caracterizar mediante una serie de ensayos. Los resultados obtenidos servirán para discutir si la experimentación se corresponde con lo dictado por el modelo analítico de presiones desarrollado para la detección de la cavitación.

Además, la puesta en marcha de la instalación y su caracterización servirán como punto de partida para el desarrollo de varios informes de prácticas que podrán usarse como guión para alguna asignatura impartida por el departamento.

Palabras clave: Venturi, cavitación.

Experimental study of cavitation in Venturi tubes

ABSTRACT

This TFG will aim to study Cavitation in Venturi tubes in an experimental way using a laboratory installation, which will have to be put into function and characterised through a series of experimental tests. The results will be used to discuss if experimentation can be related to what the analitical model of cavitation dictates.

Moreover, the installation start and its characterization will be used as a starting point for the development of a report that will serve as a pattern for some subject taught by the department.

Key words: Venturi, cavitation.

Índice general

1. Introducción	1
2. La cavitación y el ciclo de vida de las burbujas	3
2.1. Tipos de cavitación	4
2.2. Nucleación	5
2.3. El número adimensional σ	7
2.4. Dinámica de la burbuja	10
2.5. Consecuencias: erosión, vibración y ruido	11
2.6. La cavitación en la naturaleza	13
2.7. Situaciones reales	14
2.7.1. Cavitación en turbomáquinas	14
2.7.1.1. Cavitación en bombas centrífugas	14
2.7.1.2. Cavitación en turbinas	16
2.7.1.3. Cavitación en hélices	17
2.7.2. Cavitación en estrechamientos	18
2.7.2.1. Cavitación en tubos de Venturi	19
3. Descripción de la instalación experimental	25
3.1. Descripción del equipo	25
3.2. Esquema de la instalación	26
3.3. Elementos de la instalación	26
3.4. Puesta en marcha de la instalación	38
3.5. Configuraciones de funcionamiento.	39
3.6. Cálculo del caudal	42

3.6.1.	Caracterización del diafragma	42
3.6.1.1.	Coefficiente de descarga y de pérdidas.	42
3.6.1.2.	Modo de operación	44
3.6.1.3.	Toma de datos y cálculos	46
3.6.2.	Caracterización de la bomba	49
3.6.2.1.	Curva característica de la bomba	49
3.6.2.2.	Modo de operación	49
3.6.2.3.	Toma de datos y cálculos	51
4.	Modelo analítico de la instalación y predicción de la cavitación	53
4.1.	Modelo analítico para el cálculo de la presión	54
4.2.	Cálculo del caudal analítico	58
4.3.	Cálculo de la presión estática	60
4.4.	Cálculo del inicio de la cavitación	61
4.5.	Cálculo del número adimensional σ	65
5.	Estudio experimental de la cavitación	67
5.1.	Modo de operación	67
5.2.	Datos experimentales	68
5.2.1.	Ensayo I: columna de agua mínima.	68
5.2.2.	Ensayo II: columna de agua media.	69
5.2.3.	Ensayo III: columna de agua máxima.	69
5.3.	Resultados	69
5.3.1.	Resultados Ensayo I	70
5.3.2.	Resultados Ensayo II.	73
5.4.	Relación de bloqueo y constante de pérdidas en el Venturi	74
5.5.	Comparación de las presiones analíticas y experimentales	76
5.6.	Comparación de la cavitación detectada experimentalmente con la predicción analítica.	80
5.7.	Métodos para detectar la cavitación	84
6.	Resumen de los resultados y conclusiones	87
A.	Cálculo de la presión	93

B. Cálculo de la $K_{válvula}$	95
C. Guión de prácticas 1: Caracterización diafragma.	99
C.1. Objeto de la práctica.	99
C.2. Fundamento teórico.	99
C.3. Descripción de la instalación.	101
C.4. Metodología de la toma de datos.	103
C.5. Análisis y comparación de los resultados.	106
D. Guión de prácticas 2: Curva característica de la bomba.	107
D.1. Objeto de la práctica.	107
D.2. Fundamento teórico.	107
D.3. Descripción de la instalación.	108
D.4. Metodología de la toma de datos.	110
D.5. Análisis y comparación de los resultados.	113
E. Guión de prácticas 3: Modelado de la instalación.	115
E.1. Objeto de la práctica.	115
E.2. Fundamento teórico.	115
E.3. Descripción de la instalación.	117
E.4. Metodología de la toma de datos.	120
E.5. Análisis y comparación de los resultados.	121
F. Guión de prácticas 4: Detección de la cavitación.	123
F.1. Objeto de la práctica.	123
F.2. Fundamento teórico.	123
F.3. Descripción de la instalación.	124
F.4. Metodología de la toma de datos.	127
F.5. Análisis y comparación de los resultados.	128

Índice de figuras

2.1. Fases del colapso de una burbuja.	3
2.2. Perfil con cavitación de lámina y nube.	6
2.3. Cavitación de estría.	6
2.4. Hélice con cavitación de vórtice	6
2.5. Radio de la burbuja en función del tiempo	7
2.6. Conducto con estrechamiento	8
2.7. Distribución de presión en una línea de corriente[5]	9
2.8. Parámetros característicos de una burbuja.[5]	11
2.9. Sobrepressiones en el colapso de una burbuja. Realizado por Shima, Takayama, Tomita y Ohsawa.	12
2.10. Erosión por cavitación.	13
2.11. Distribución de presiones en una bomba. Fuente: Web de Grundfos. .	16
2.12. Ángulos de lanzamiento circunferencial.	18
2.13. Salto de presión en la garganta del Venturi.	19
2.14. Parámetros geométricos característicos de un Venturi.	20
2.15. Venturi.	21
2.16. Campo longitudinal de presión en un tubo de Venturi.	23
3.1. Esquemas de la instalación.	27
3.2. Bomba centrífuga de la instalación.	28
3.3. Coeficiente de pérdidas de carga en función del ángulo de apertura. Fuente: Miller.	30
3.4. Válvula de membrana de la instalación.	30
3.5. Constante de pérdidas de una válvula de bola.	31
3.6. Válvulas de bola de instalación.	32

3.7. Manómetro diferencial de mercurio(izq.) y batería de manómetros de agua(der.) de la instalación.	32
3.8. Manómetro y vacuómetro de la instalación.	33
3.9. Geometría y tubos de Venturi de la instalación.	34
3.10. Geometría y diafragma de la instalación.	35
3.11. Esquema de los depósitos.	36
3.12. Depósitos de la instalación.	36
3.13. Desviador de flujo de la instalación.	37
3.14. Interruptor de la instalación.	37
3.15. Instalación experimental.	38
3.16. Configuración A.	40
3.17. Configuración B.	40
3.18. Configuración C.	41
3.19. Esquema de un diafragma.	43
3.20. Instalación con tramo recto de PVC.	44
3.21. Posición de las válvulas de bola y desviador para el paso 3.	45
3.22. Resultados del diafragma representados gráficamente.	48
3.23. Flujo guiado al depósito inferior.	50
3.24. Curva característica de la bomba.	52
4.1. Gráfica $K_{válvula}$ frente al caudal	60
5.1. Diferencia en la medida de presión estática y total.	68
5.2. Garganta del Venturi con cavitación.[7]	70
5.3. Longitud de la nube de vapor frente a la apertura.	71
5.4. Relación de presiones frente a caudal en el Venturi (I).	72
5.5. Relación de presiones frente a caudal en el Venturi (II).	73
5.6. Relación de presiones frente a caudal en el Venturi (I).	74
5.7. Comparación del modelo analítico con el experimental.	78
5.8. Presiones analíticas frente al nivel de apertura.	81
5.9. Presiones experimental frente al caudal experimental.	82
5.10. Comparación de las presiones estáticas en la garganta del Venturi.	83

B.1. Correlación entre $K_{válvula}$ y el grado de apertura.	97
C.1. Esquema de un diafragma.	100
C.2. Puntos más significativos de la instalación.	102
C.3. Configuración A.	103
C.4. Instalación con tramo recto de PVC.	104
C.5. Posición de las válvulas de bola y desviador para el paso 3.	105
D.1. Puntos más significativos de la instalación.	109
D.2. Configuración B.	110
D.3. Flujo guiado al depósito inferior.	112
E.1. Puntos de la instalación	116
E.2. Correlación entre $K_{válvula}$ y el grado de apertura.	117
E.3. Puntos más significativos de la instalación.	119
E.4. Configuración B.	120
F.1. Salto de presión en la garganta del Venturi.	124
F.2. Puntos más significativos de la instalación.	125
F.3. Configuración B.	126

Índice de tablas

3.1. Parámetros físicos de la tubería de PVC	28
3.2. Coeficientes de pérdidas en la tubería de PVC.	28
3.3. Parámetros físicos de elementos(codos,T,...).	29
3.4. Parámetros físicos de la válvula de membrana.	29
3.5. Parámetros del Venturi rectangular.	33
3.6. Parámetros físicos del diafragma.	34
3.7. Datos recogidos del diafragma.	46
3.8. Parámetros geométricos y físicos.	46
3.9. Caudales, diferencias de alturas y n° de Reynolds en el diafragma. . .	47
3.10. Coeficientes de descarga del diafragma y errores relativos.	48
3.11. Datos recogidos de la bomba.	51
3.12. Altura manométrica de la bomba y caudal.	51
4.1. Elementos en cada uno de los puntos de análisis de la instalación. . .	54
4.2. Altura geométrica de los puntos de la instalación.	55
4.3. Presión estática en los puntos significativos de la instalación.	61
4.4. Coeficientes de cavitación para distintas presiones de trabajo.	65
5.1. Datos ensayo I.	68
5.2. Datos ensayo II.	69
5.3. Presiones absolutas en el Venturi(Ensayo I).	70
5.4. Longitud de la nube de vapor.	71
5.5. Presiones absolutas en el Venturi(Ensayo II).	73
5.6. Relación de presiones frente a caudal en el Venturi (II).	74
5.7. Constante de pérdidas del Venturi	75

5.8. Presiones en m.c.a. Teórica y experimental.	76
5.9. Error relativo del modelo analítico.	79
5.10. Presiones analíticas en la garganta(presiones absolutas). $z_0 = 24,5 \text{ cm}$	80
5.11. Presiones experimental en la garganta(presiones absolutas)	82
6.1. Pérdidas de carga en la válvula de membrana.	88
B.1. Constante de pérdidas de carga de la válvula de membrana.	96
B.2. <i>K</i> válvula para diferentes grados de apertura.	97
C.1. Caudales, diferencias de alturas y n^o de Reynolds en el diafragma. . .	106
D.1. Datos recogidos de la bomba.	112
E.1. Presiones en m.c.a. Teórica y experimental.	121
F.1. Datos ensayo de cavitación.	128

Capítulo 1

Introducción

Quizás uno de los problemas más indeseados en el campo de la ingeniería hidráulica y naval es la cavitación. Los ingenieros deben poner especial cuidado en el diseño de hélices, rodets y cualquier otro elemento por el que circule un líquido a una velocidad relativamente alta, ya que la conservación de la constante de Bernoulli podría provocar un descenso de la presión y, por tanto, la aparición de pequeñas burbujas que deterioran los componentes cercanos generando ruido y vibraciones, además, de ser culpables de un descenso significativo del rendimiento de la máquina como consecuencia de la modificación del campo fluido.

Cuando este fenómeno está muy desarrollado, el flujo aguas abajo se vuelve turbulento y es necesario un estudio estadístico con las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas o ecuaciones de Reynolds para la turbulencia como herramienta de análisis. En cambio, para entender la cavitación y poder predecir la dinámica de las burbujas se utiliza la ecuación de Rayleigh-Plesset, de la cual hablaremos más adelante.

En el desarrollo de este texto, se expondrá un estudio detallado sobre la cavitación en un tubo de Venturi. Para ello se ha usado una instalación hidráulica de laboratorio, la cual ha sido caracterizada previamente a partir de una serie de ensayos que han servido para obtener las pérdidas de carga, caudal de la bomba, etc. Una vez hecho esto, se ha usado la instalación para analizar la cavitación de una forma experimental y, al mismo tiempo, los datos recogidos han servido para validar un modelo analítico, el cual predice el caudal y la distribución de presiones en función del nivel de apertura de una válvula reguladora de flujo.

Capítulo 2

La cavitación y el ciclo de vida de las burbujas

La cavitación puede aparecer por diversos factores, tales como la propagación de ondas de sonido a través del líquido o el aporte de energía con un potente láser, pero la definición más común es considerarla un fenómeno hidrodinámico que consiste en vaporizaciones localizadas en el seno de un líquido como consecuencia de un descenso de la presión absoluta por debajo de la de vapor[15].

Como ya sabemos, la presión de vapor es característica de cada estado termodinámico; a esta presión, un líquido comienza a vaporizarse manteniendo el equilibrio con su propio vapor. En el caso del agua, su presión de vapor a una temperatura de 100 °C son 101.325 Pa, es decir, la presión atmosférica.

En la cavitación, cuando el líquido cambia a fase gaseosa aparecen burbujas de vapor que son arrastradas por la corriente aguas abajo, donde un aumento de presión las hace implosionar. En la Figura 2.1 se pueden observar las distintas fases de cómo colapsan.

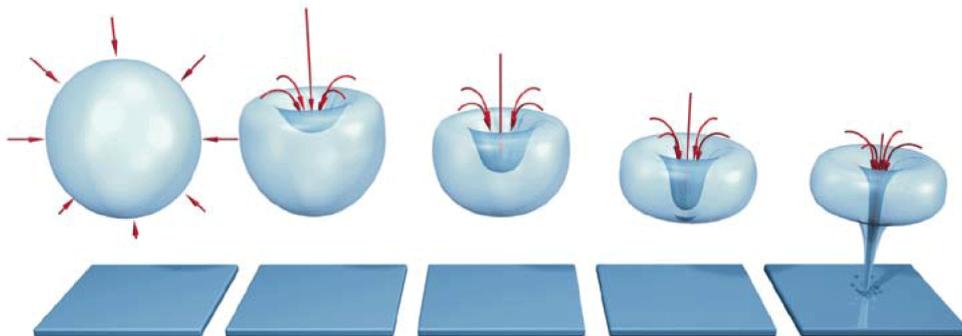


Figura 2.1: Fases del colapso de una burbuja.

Como ya se ha dicho, cuando la burbuja llega a una zona donde la presión es mayor que la crítica, el vapor condensa y el espacio ocupado por éste no puede ser íntegramente cubierto por el líquido condensado, ya que existe una gran diferencia entre los volúmenes específicos de las fases gaseosa y líquida, por tanto, para rellenar esta discontinuidad, el líquido próximo a la cavidad se acelera generando un microchorro como el de la Figura 2.1 en la página anterior. Si esto ocurre sobre una superficie como un álabe de forma continuada, la erosión acaba por destruirlo.

Descrito brevemente el ciclo de vida de las burbujas generadas por cavitación, desde su formación por un descenso de la presión hasta su posterior implosión en zonas de altas presiones, es interesante prestar mayor atención al proceso de nucleación de éstas y a los diferentes tipos de cavitación que existen.

2.1. Tipos de cavitación

Antes de entrar en el tema de la nucleación, vamos a diferenciar entre dos tipos de cavitación dependiendo del desencadenante que origina la micro-cavidad en el líquido. Tenemos:

- Cavitación homogénea: ocurre cuando las cavidades se forman tras vencer las tensiones de unión intermoleculares de la sustancia pura. Claramente, el conseguir un líquido totalmente libre de impurezas en la práctica es sumamente complicado, por lo que este tipo de cavitación sólo puede considerarse en casos muy concretos.
- Cavitación heterogénea: su inicio tiene lugar sobre las impurezas que están en suspensión en la corriente o en las irregularidades de las superficies que la rodean. Es el tipo de cavitación que ocurre en los procesos reales, puesto que es mecánicamente imposible conseguir acabados superficiales totalmente lisos, sin ningún tipo de rugosidad o defecto, ni tampoco alcanzar un líquido libre de pequeñas partículas o gases disueltos.

Otra manera de clasificar la cavitación es a partir de su carácter macroscópico; en este caso tenemos[6]:

- Cavitación de burbujas separadas: aparecen de forma aislada y no son, normalmente, un riesgo grave para la instalación.
- Cavitación de nube(zona derecha de la Figura 2.2 en la página 6): cuando la densidad de las burbujas es alta. Suele ser común que ocurra en perfiles fuselados, en la zona de desprendimiento de la capa límite. Es muy perjudicial.

- Cavitación de lámina(zona izquierda de la Figura 2.2 en la página siguiente): ocurre sobre superficies con alta velocidad, como en los álabes de un rodete. Se extiende a lo largo de la capa límite y disminuye la sección de paso reduciendo drásticamente el rendimiento de la máquina.
- Cavitación en estría(Figura 2.3 en la página siguiente): la nucleación se produce siguiendo una misma línea.
- Cavitación de vórtice(Figura 2.4 en la página siguiente): es generada por perfiles con fuertes ángulos de ataque como, por ejemplo, las hélices de propulsión marina que dan lugar a la formación de tubos de vorticidad.

2.2. Nucleación

Dentro de una máquina hidráulica, estrechamiento, rodete, . . . existen zonas que son más propensas a albergar el fenómeno de la cavitación; las causas pueden variar desde motivos geométricos o irregularidades en las superficies mojadas hasta, simplemente, partículas en suspensión.

Todo proceso de cavitación presenta tres fases [13]:

- Comienzo de la cavitación(*cavitation inception stage*), se produce en las zonas de la corriente donde se cumple la condición de una presión lo suficientemente baja para vencer las uniones moleculares del líquido puro(nucleación homogénea) o, en su defecto, situaciones de presión menos extremas y, por tanto, más cercanas a la de vapor pero con impurezas en el líquido que sirven de agentes nucleantes(nucleación heterogénea).
- Crecimiento de la burbuja(*growth bubble*), propiciado por el desequilibrio de presiones entre la presión dentro y fuera de la burbuja. Este aumento suele ser de unas 20 o 30 veces el radio inicial y se produce en tiempos inferiores a 1 segundo; por ejemplo, una burbuja de 2 mm de radio en su fase inicial, no alcanzaba apenas una décima de milímetro en su inicio [14]. Existen tres modos de crecimiento [3]:
 - Cavitación gaseosa: la burbuja crece a causa del transporte de gas a través de la interfase. Se trata de un proceso lento si no hay términos convectivos importantes.
 - Pseudo-cavitación: la burbuja aumenta de tamaño como consecuencia del cambio de presión pero en ausencia de transporte de masa.

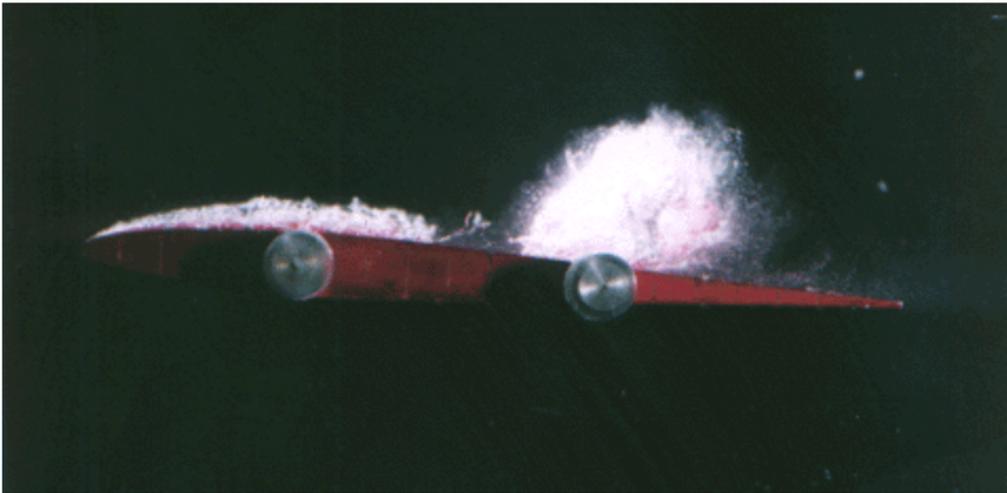


Figura 2.2: Perfil con cavitación de lámina y nube.



Figura 2.3: Cavitación de estría.

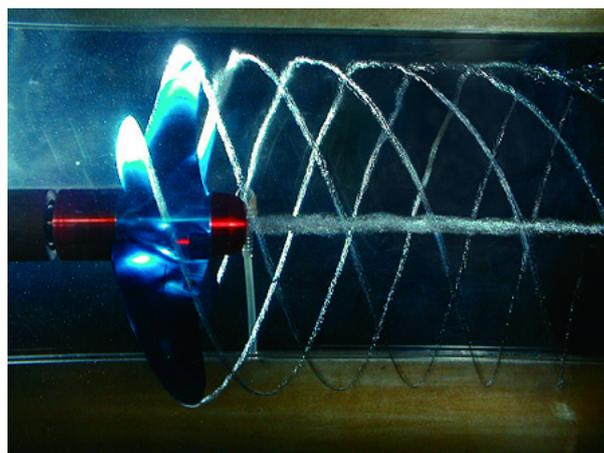


Figura 2.4: Hélice con cavitación de vórtice

- Cavitación vaporosa: en este caso la burbuja crece rápidamente debido a la transferencia de vapor a través de la interfase.
- Fase final (*dissolution stage*) en la que se produce la implosión de las burbujas en zonas de alta presión. Este proceso es muy rápido puesto que la velocidad de colapso es mucho mayor que la de crecimiento como puede observarse en la Figura 2.5.

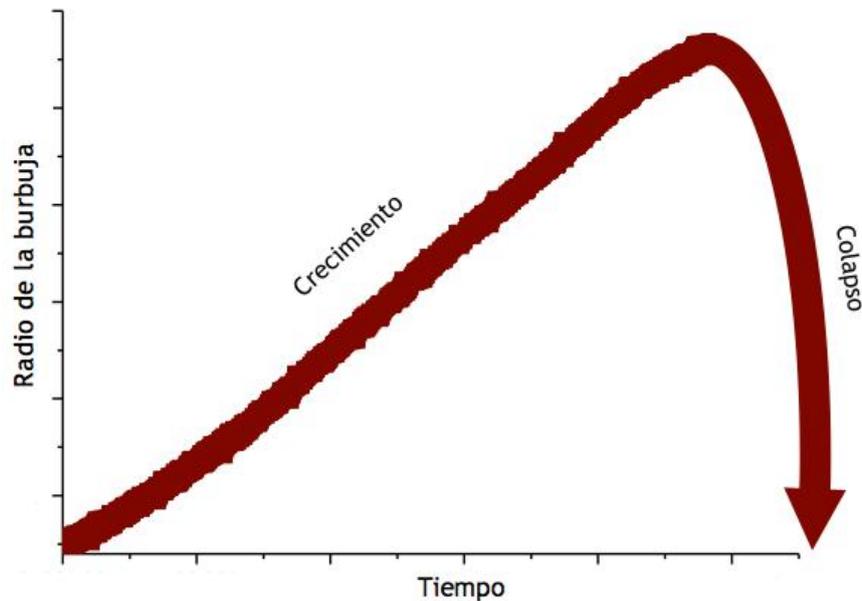


Figura 2.5: Radio de la burbuja en función del tiempo

La nucleación es una etapa que depende de diversos factores: viscosidad, densidad, temperatura, pureza del líquido,... y esto nos impide señalar un instante y lugar concreto para el inicio de la cavitación. Existen programas de mecánica de fluidos computacional que llegan a obtener resultados muy próximos a los reales; en cambio, en una primera aproximación suele usarse para determinar si existe cavitación o no, un parámetro adimensional que describimos en la siguiente sección.

2.3. El número adimensional σ

Como suele ser habitual en la mecánica de fluidos, el fenómeno de la cavitación también tiene relacionado un número adimensional, el cual se define como [6],

$$\sigma = \frac{p_{\infty} - p_v}{\frac{1}{2}\rho_l U_{\infty}^2} \quad (2.1)$$

donde,

p_∞ es la presión absoluta medida desde un punto de referencia, normalmente la presión aguas arriba;

p_v es la presión de vapor del líquido para la temperatura de ensayo;

ρ_l es la densidad;

U_∞ es la velocidad del punto de referencia;

Este parámetro adimensional nos da la relación entre la diferencia de presión, $\Delta p = p_\infty - p_v$, y la presión dinámica del punto M (Figura 2.6).

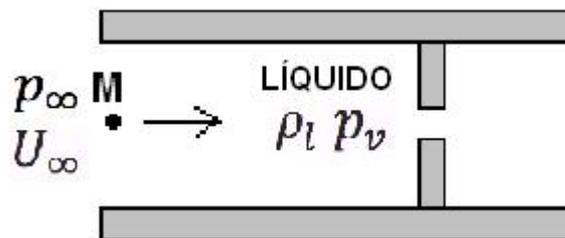


Figura 2.6: Conducto con estrechamiento

Como es lógico [5], cualquier flujo, presente o no cavitación, tiene un σ determinado. Únicamente, para valores pequeños del parámetro existe riesgo real de que aparezca cavitación, puesto que con un pequeño decremento de presión estaríamos por debajo de la presión crítica.

Antes de hacer un análisis de los valores singulares del número σ , es conveniente introducir otro número adimensional, el coeficiente de presión, C_p . [5] Este parámetro es una relación entre la diferencia de presiones en un punto concreto del campo fluido y la presión aguas arriba, partido todo de la presión dinámica, es decir,

$$C_p(x_i) = \frac{p(x_i) - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho_l U_\infty^2} \quad (2.2)$$

En el caso de un fluido ideal, sin fricción ni viscosidad, el coeficiente es solo función de la geometría y es aplicable la ecuación de Bernoulli, sin embargo, si el fluido presenta una viscosidad y fricción significativa, el parámetro adimensional dependerá además del número de Reynolds,

$$C_p = f(x_i, Re) \quad (2.3)$$

Por lo cual, para un fluido no ideal se cumple la igualdad 2.3.

Para simplificar el siguiente razonamiento supongamos una situación de cavitación debida puramente a la geometría del elemento atravesado por la corriente; la distribución de presión a lo largo de una línea de corriente se puede representar a través de C_p , obteniendo algo similar a la Figura 2.7.

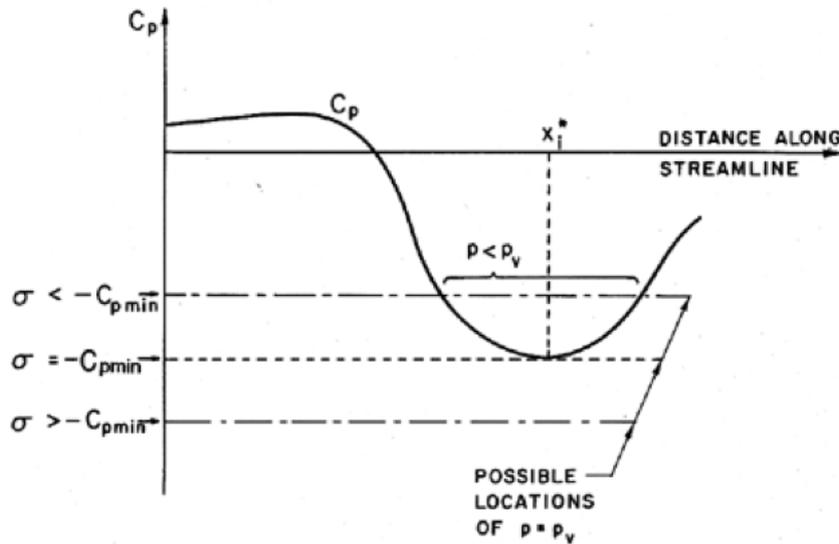


Figura 2.7: Distribución de presión en una línea de corriente[5]

Si el flujo interior viene definido por una presión de vapor p_v , una presión y velocidad aguas arriba de p_∞ y U_∞ respectivamente, quedará definido el número adimensional σ . Además, tendremos diferentes valores de C_p , dependiendo del punto sobre la línea de corriente donde nos encontremos; [4] es razonable pensar que si hay alguna zona con condiciones para la nucleación de burbujas por cavitación, sea en el punto de presión mínima, o lo que es igual, el punto determinado por $C_{p,min}$, que al tratarse de un valor negativo tenemos que,

$$\sigma = -C_{p,min} \quad (2.4)$$

La igualdad 2.4 determina un punto crítico, donde se produciría una cavitación inminente si estuviésemos trabajando bajo condiciones ideales. En la práctica el parámetro σ_{real} no coincide con el teórico debido a estas razones [4]:

1. Los líquidos presentan una resistencia a la tensión que retrasa la aparición de las burbujas hasta que la presión no cae una cierta cantidad por debajo de la presión de vapor.
2. La contaminación del líquido con partículas u otros gases disueltos favorece la nucleación.

3. Se necesita un tiempo mínimo de residencia para que las burbujas crezcan y sean macroscópicamente observables.
4. El C_p es un valor promediado, por lo que en los flujos turbulentos existirán zonas donde la presión local será menor que la de vapor aunque la media global sea superior.

Obviando estas condiciones y suponiendo flujo ideal podemos resumir que cuando,

- $\sigma > -C_{p,min}$: No aparece cavitación.
- $\sigma = -C_{p,min}$: Posible inicio de cavitación.
- $\sigma < -C_{p,min}$: Cavitación desarrollada.

Estos tres casos particulares aparecen en la Figura 2.7 en la página anterior.

2.4. Dinámica de la burbuja

Estudiar analíticamente el movimiento de las burbujas en un flujo real se convierte en un problema muy complejo si no se aplican una serie de hipótesis que simplifiquen el modelo. Esto fue lo que hizo a comienzos del siglo pasado el físico inglés Rayleigh al deducir la ecuación que hoy lleva su nombre. La ecuación viene derivada de las ecuaciones de Navier-Stokes para una geometría esférica y simétrica. Sin embargo, aunque fue en 1917 el mismo Rayleigh quien obtuvo estas ecuaciones despreciando la tensión superficial y la viscosidad, no fue hasta 1949 cuando Milton S. Plesset las aplicó al fenómeno de la cavitación para describir la trayectoria de las burbujas.

Algunas hipótesis que se tienen en cuenta con el fin de simplificar el modelo son las siguientes,

- la densidad del líquido es constante e igual a ρ , por tanto, estamos en un caso de fluido incompresible ($\nabla \cdot v = 0$).
- la viscosidad dinámica es constante e igual a μ .
- la temperatura, T_b , y presión, p_b , dentro de la burbuja son homogéneas.
- a una distancia significativa de la burbuja la presión y la temperatura son p_∞ y T_∞ , respectivamente.
- la geometría de la burbuja es considerada esférica.

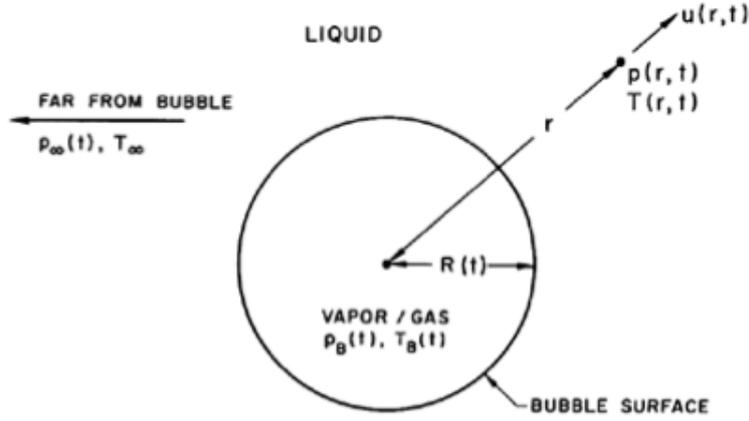


Figura 2.8: Parámetros característicos de una burbuja.[5]

Esta situación viene representada en la Figura 2.8.

Tenemos un punto en el seno del fluido con una coordenada radial, r , medida desde el centro de la burbuja. Está caracterizado por una presión $p(r, t)$, una temperatura $T(r, t)$ y una velocidad $u(r, t)$. La frontera de la burbuja viene definida por la función $R(t)$. La ecuación de Rayleigh-Plesset viene dada por la siguiente expresión,

$$\frac{p_b(t) - p_\infty(t)}{\rho} = R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{4\nu}{R} \frac{dR}{dt} + \frac{2S}{\rho R} \quad (2.5)$$

donde ν_l es la viscosidad cinemática del líquido y S la tensión superficial de la burbuja[5].

2.5. Consecuencias: erosión, vibración y ruido

La formación de las burbujas en sí, no supone un riesgo para la integridad de la instalación en la que ocurre la cavitación sino el colapso de éstas es lo que conlleva consecuencias catastróficas para las superficies cercanas. Como ya sabemos, la fase final de la cavitación es la implosión de las burbujas y, es en esta fase cuando se generan grandes sobrepresiones y aumentos de temperatura locales. Hickling y Plesset llegaron en 1964 a predecir que la presión de pico aproximada es,

$$p_p \approx 100 R_{max} \frac{p_\infty}{r} \quad (2.6)$$

siendo R_{max} el radio máximo de la burbuja y r la distancia desde el centro de la burbuja al punto donde queremos obtener la presión de pico.

Esta última expresión prevé presiones de pico en las proximidades de la burbuja de cien veces la presión aguas arriba; esto provoca que con una presión $p_\infty = 1 \text{ bar}$

a una distancia $r = R_{max}$, la presión aumente hasta los 100 bares. Podemos apoyarnos en los resultados experimentales de la Figura 2.9 para comprobar que la aproximación 2.6 es bastante acertada.

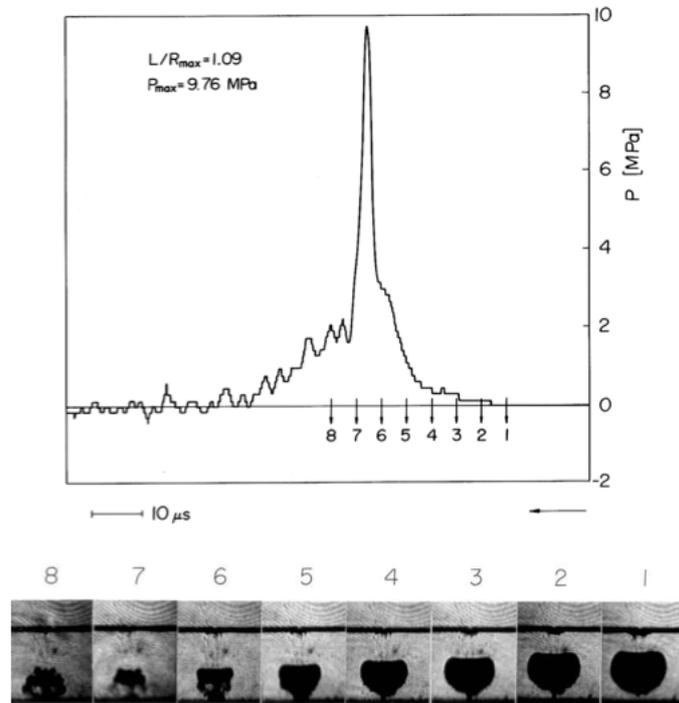


Figura 2.9: Sobrepresiones en el colapso de una burbuja. Realizado por Shima, Takayama, Tomita y Ohsawa.

Se aprecia que la presión máxima se alcanza entre la etapa 6 y 7 que coincide con la fase de mínimo volumen en la burbuja. Las variaciones entre la aproximación de $100 \text{ bar} = 10 \text{ MPa}$, y el pico real de $9,76 \text{ MPa}$ son debidas principalmente a la compresibilidad real del fluido, que actúa atenuando las ondas de presión[5].

Si esta situación de alta presión ocurre cerca de una superficie de forma continuada, la erosión progresiva desemboca en la inutilización total de la hélice, válvula o elemento de impacto de las burbujas(Figura 2.10 en la página siguiente).

Lo que en realidad impacta sobre la superficie no es la burbuja en sí, sino el mismo fluido acelerado por la diferencia de presiones entre la burbuja y el líquido exterior(Figura 2.1 en la página 3).

Las ondas de presión generadas son de una frecuencia audible para el oído humano, por lo que uno de los síntomas evidentes de la cavitación es el ruido. Como es lógico, estas mismas ondas de presión generan vibraciones en la zona de colapso de las burbujas. Estos dos últimos efectos son muy cuidados en el diseño de navíos y submarinos militares, pues las ondas generadas podrían señalar la posición de estas embarcaciones en los sónares enemigos.

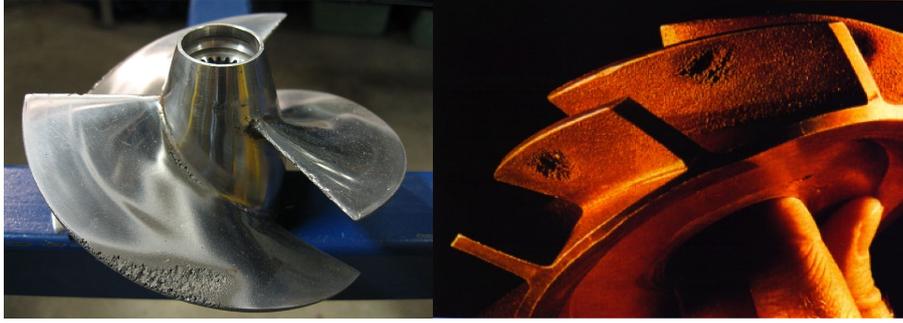


Figura 2.10: Erosión por cavitación.

Otro efecto menos conocido es el generado por los grandes gradientes de temperatura que durante la implosión de la burbuja llegan a provocar temperaturas de 3000 K durante una fracción de microsegundo, sin embargo, Fukijawa y Akamatsu comprobaron que a los 2 milisegundos la temperatura se reducía a unos 300 K. A estos resultados se puede llegar también gracias a otra ecuación característica de la cavitación, la ecuación de Plesset-Zwick; ésta tiene en cuenta la presencia de un gas contaminante, por lo que la presión en la burbuja vendrá dada por,

$$p_b(t) = p_v(T_b) + p_{g0} \left(\frac{T_b}{T_\infty} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 \quad (2.7)$$

Sustituyendo este término en la ecuación de Rayleigh-Plesset, 2.5, y linealizando el término térmico llegaríamos a la expresión que determina la temperatura de la interfase [5]. Normalmente, la diferencia de temperaturas, $T_b - T_\infty$, es despreciable y no se considera que influya significativamente en el comportamiento de la burbuja.

2.6. La cavitación en la naturaleza

Aunque parece un fenómeno poco natural, éste también se da en nuestro entorno. Vamos a comentar algunos casos a modo de ejemplo [3]:

- En las plantas o arboles con una altura considerable la depresión generada por la evaporación del agua en la zona superior provoca que el gas disuelto se libere en forma de burbujas. Esto provoca, en la mayoría de casos, la muerte del árbol.
- En el reino animal, los delfines no alcanzan velocidades más altas porque el colapso de las burbujas sobre sus aletas les provoca un dolor molesto. En cambio, los atunes sí que soportan esta incomodidad aunque la cavidad de vapor y gas generada sobre su aleta conlleva una pérdida de eficiencia.

- En las articulaciones de nuestro cuerpo también puede darse este fenómeno; éstas se encuentran separadas por el líquido sinovial que las lubrica. Cuando forzamos una de ellas, la cápsula se dilata y la depresión generada provoca que se forme una burbuja en el seno de este líquido; en el momento en que la burbuja colapsa se oye el característico crujido.

2.7. Situaciones reales

El fenómeno de la cavitación, bajo condiciones atmosféricas, necesita un fuerte descenso de la presión para conseguir la nucleación de estas catastróficas burbujas, por lo que ocurre en zonas donde el fluido tiene una alta energía cinética; tales situaciones son comunes en bombas hidráulicas, estrechamientos, diafragmas, . . . La cavitación no es un fenómeno deseado en la mayoría de los casos, todo lo contrario, se desea evitar a toda costa pues su aparición provoca inconvenientes, como ya se ha comentado en el apartado anterior. Es debido precisamente a todos esos inconvenientes por lo que se estudian muy a fondo las condiciones bajo las cuales aparece dicho fenómeno ya que así podremos evitarlas o al menos atenuar sus consecuencias. En cambio, en los tubos de Venturi es muy usual que se provoquen las condiciones de cavitación para regular el flujo. También se le está sacando partido a este fenómeno en los tratamientos anticelulitis, mecanismos para eliminar piedras del riñón, limpieza de superficies, . . . [3].

A continuación, de una forma breve hablaremos de las características más importantes de los dos casos de cavitación más frecuentes: cavitación en máquinas rotatorias y en estrechamientos, aunque en el presente trabajo se prestará una mayor atención al último caso, concretamente, en un tubo de Venturi.

2.7.1. Cavitación en turbomáquinas

2.7.1.1. Cavitación en bombas centrífugas

Este tipo de máquina hidráulica es muy frecuente en cualquier sector de la industria como herramienta para el transporte de líquidos entre distintos niveles, o directamente, como inyector de presión en una red. La elección del punto de funcionamiento es vital para evitar las condiciones de cavitación y, por tanto, un deterioro prematuro del impulsor. Se distinguen dos tipos de cavitación diferentes:

Cavitación por succión [15, 17]. Ésta aparece cuando la altura neta de succión disponible $NPSH_a$ (*available Net Positive Suction High*) es menor que la altura neta requerida $NPSH_r$ (*required Net Positive Suction High*). Pasamos a explicar que significan estos parámetros.

La NPSHa depende de la instalación y del líquido a bombear. Se trata de la presión mínima medida en m.c.l. (metros de columna de líquido) a la que desciende el fluido justo en la zona central del impulsor; se calcula como,

$$NPSHa = \frac{P_a - P_v}{\rho g} - \Delta z_{asp} - \Delta H_{asp} \quad (2.8)$$

donde,

Δz_{asp} es la diferencia de altura entre el inicio de la tubería de aspiración y la bomba,

ΔH_{asp} es la altura equivalente, en m.c.l., que engloba todas las pérdidas de carga de la aspiración.

La NPSHr es un valor propio de cada tipo de bomba que varía según el tamaño, modelo, etc., por lo tanto, debe ser proporcionado por el fabricante. Indica la presión mínima que se necesita en el ojo del impulsor para evitar la cavitación. Su expresión analítica es la siguiente,

$$NPSHr = \frac{U_e^2}{2g} + H_z \quad (2.9)$$

donde,

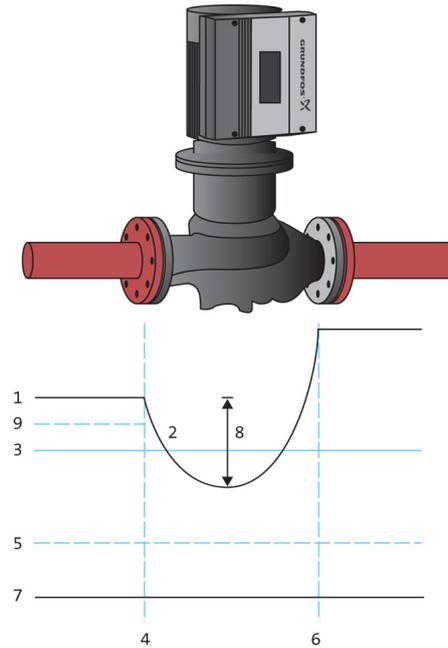
U_e es la velocidad de entrada a la bomba,

H_z es la presión estática mínima, en m.c.l., necesaria a la entrada del rodete.

En resumen, la condición de que $NPSHa > NPSHr$ garantiza que la presión mínima dentro de la bomba sea siempre mayor que la de vapor de manera que no se produce riesgo de cavitación. La Figura 2.11 en la página siguiente representa una situación real de bombeo donde la presión de entrada, (1), es superior a la mínima determinada por la NPSH requerida, (9), por lo cual, la instalación no sufre este tipo de cavitación.

Cavitación de descarga [17]. Se produce cuando la presión de descarga en la impulsión es muy elevada. Esto obliga a gran parte del fluido a circular en sentido contrario, hacia el interior de la bomba; el líquido fluye a través de un pequeño espacio existente entre el rodete y el tajamar, lo que conlleva la aceleración del fluido generándose una situación similar a la que sucede en un tubo de Venturi. Esta situación se da cuando la máquina hidráulica trabaja a un 10 % por debajo del punto óptimo.

Las consecuencias son las normales de este fenómeno: vibración, ruido y picaduras más concentradas en el tajamar; además, el eje se sobrecarga debido a la alta presión que ejerce la columna de la impulsión y puede terminar rompiendo.



1. Presión de aspiración 2. Línea de presión 3. Presión atmosférica 4. Entrada de la bomba 5. Presión de evaporación 6. Descarga de la bomba 7. Vacío 8. NPSH 9. NPSHR.

Figura 2.11: Distribución de presiones en una bomba. Fuente: Web de Grundfos.

2.7.1.2. Cavitación en turbinas

Las turbinas son turbomáquinas utilizadas para la obtención de potencia mecánica que, habitualmente, se transforma mediante generadores en potencia eléctrica. El problema de la cavitación aparece en las turbinas hidráulicas (turbina Francis, Pelton...), ya que trabajan con fluidos en fase líquida y puede producirse la vaporización. En cambio, las instalaciones de turbinas de gas y vapor bien dimensionadas, es decir, sin condensación en la turbina, están libres de este catastrófico fenómeno.

Existen algunas diferencias en la cavitación de este tipo de máquinas con respecto a las bombas. La principal es la zona donde se produce; aquí la zona de baja presión y alta velocidad se encuentra a la salida del rodete y no a la entrada como ocurría en las bombas [16].

Se puede demostrar usando el teorema de Bernoulli que entre un punto a la salida, s , y un punto aguas abajo, θ , a presión ambiente, la presión en s es,

$$\frac{P_s}{\rho g} = \frac{P_a}{\rho g} - \Delta z + \Delta H_{s,0} - \frac{U_s^2}{2g} \quad (2.10)$$

Tomamos el punto s como el de mínima presión, aunque en realidad, esto solo

es una aproximación ya que la máxima depresión se produce en una zona interna del rodete y depende de la velocidad y geometría de éste. La turbina trabajará sin cavitación siempre que $P_s > P_v$, por tanto, esta expresión queda en términos de presión específica como,

$$\frac{P_a}{\rho g} - \Delta z + \Delta H_{s,0} - \frac{U_s^2}{2g} > \frac{P_s}{\rho g} \quad (2.11)$$

donde vemos como ahora las pérdidas de carga en la tubería aguas abajo, $\Delta H_{s,0}$, ayudan a evitar la cavitación(al contrario que en las bombas)[16].

2.7.1.3. Cavitación en hélices

Un diseño eficiente de una hélice es aquel que genera una cavitación mínima y, además, la implosión de las burbujas no se produce sobre la hélice sino aguas abajo.

Cuando se diseñaron los primeros buques transatlánticos [11], se desconocía por completo las causas de este fenómeno y las hélices eran reemplazadas en cada trayecto ya que la erosión debida a la implosión de las burbujas las inutilizaba. Actualmente, aunque conocemos el porqué de este suceso no es posible eliminar por completo la cavitación en las hélices, no obstante, sí hemos mejorado en su control y en la atenuación de sus consecuencias.

Aunque la dinámica de fluidos computacional está muy desarrollada, en procesos como el de la cavitación donde intervienen tantos parámetros es aconsejable comparar los resultados con datos empíricos. Es por esto que se construyen prototipos a escala que se prueban en túneles de cavitación para estudiar la generación de este fenómeno, los efectos de erosión, y las fluctuaciones de presión. Estas simulaciones previas a la construcción del modelo real aseguran, en cierta manera, que éste no falle prematuramente una vez la embarcación zarpe.

Algunos parámetros importantes en el diseño para evitar la generación de cavitación y sus consecuencias son los siguientes:

- Lanzamiento circunferencial: se define como el ángulo, en la vista proyectada de la hoja, entre una línea trazada desde la punta de la pala hasta la línea central del eje y una segunda línea desde el centro del eje tangente a la curvatura. El ángulo más pronunciado, θ_2 (Figura 2.12 en la página siguiente), hace que el borde de ataque de la pala entre en el fluido de una forma progresiva evitando la cavitación [9].
- Profundidad de la hélice: en grandes embarcaciones donde el diámetro de la hélice es significativo, la zona más cercana a la superficie libre es más propensa a desarrollar cavitación ya que su presión estática es menor que la de la zona baja.

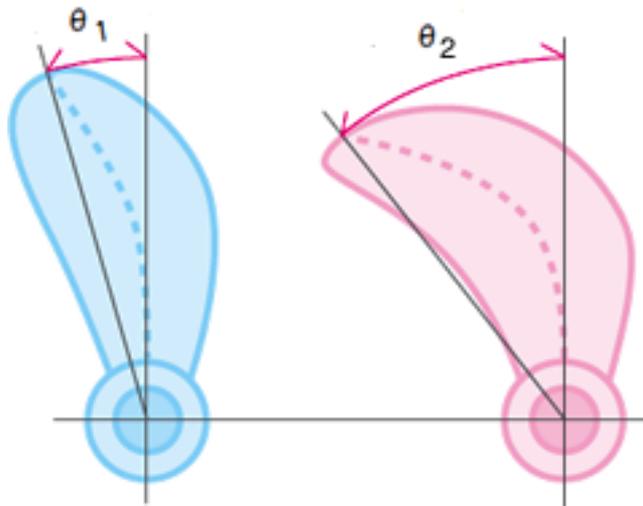


Figura 2.12: Ángulos de lanzamiento circunferencial.

- Régimen de giro y velocidad de la embarcación: el borde de las palas es la zona con mayor energía cinética debida, en primer lugar, a la rotación de la propia hélice y, por otro lado, al desplazamiento del barco. Esto conlleva que la presión en esta zona pueda caer en algún momento por debajo de la presión de vapor.

En cambio, en los barcos de alta velocidad (velocidad rotativa y de avance alta con poca profundidad de la hélice) la cavitación es inminente. Por ello están dotados de hélices super-cavitantes, las cuales están perfiladas para que la cavidad generada se extienda hasta el borde de la pala y la implosión ocurra aguas abajo.

2.7.2. Cavitación en estrechamientos

La cavitación puede aparecer también en los cambios de sección bruscos, como consecuencia de la aceleración del fluido y el forzoso descenso de la presión el cual viene obligado por el teorema de Bernoulli. Este tipo de cavitación es muy habitual en diafragmas, tubos de Venturi y en zonas donde se regula el caudal mediante el estrangulamiento de una válvula.

En el siguiente apartado hablaremos más tendidamente sobre los valores particulares que toma la constante σ , y como influye la geometría del Venturi en la formación de las burbujas y de las aplicaciones de este fenómeno.

Fundamento teórico El principio de Bernoulli afirma que la energía de un fluido se conserva bajo condiciones de flujo ideal. Por tanto, la ecuación de Bernoulli está

compuesta por la suma de tres factores, la cual se mantienen constante a lo largo de cada línea de corriente. Estos términos, energía cinética, presión y energía potencial gravitatoria, componen la constante de Bernoulli,

$$\underbrace{\frac{1}{2}\rho U^2}_{\text{Energía cinética}} + \underbrace{P}_{\text{Presión}} + \underbrace{\rho gh}_{\text{Energía potencial gravitatoria}} = cte \quad (2.12)$$

En esta expresión se observa claramente, si suponemos el conducto o Venturi horizontal y, por tanto, sin diferencia de energía potencial entre los puntos considerados, que cuando un fluido es acelerado su presión está obligada a disminuir para conservar la constante, y esto puede llevar a que la presión se reduzca a niveles por debajo de la crítica dando lugar a la vaporización localizada del fluido. Para llegar a esta situación crítica, la instalación dispone de un tubo de Venturi.

Estos tubos son comúnmente usados en varios sectores de la industria y agricultura. Por ejemplo, los carburadores utilizan el efecto Venturi para aspirar el carburante y mezclarlo con aire; otra aplicación es como medio de adicción de abonos al caudal de riego.

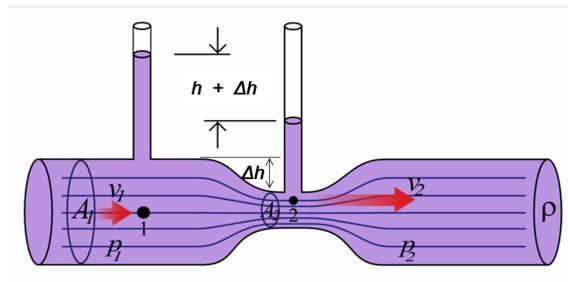


Figura 2.13: Salto de presión en la garganta del Venturi.

En la Figura 2.13 tenemos un tubo de Venturi en el cual podemos ver la diferencia de presiones entre los puntos 1 y 2; la presión en 2 se reduce a causa del cambio en la sección, y esto, conlleva un aumento en la velocidad del fluido por el motivo que ya hemos comentado. Esta depresión es aprovechada en las aplicaciones citadas anteriormente, y en nuestro caso, será la zona de posible inicio de la cavitación.

2.7.2.1. Cavitación en tubos de Venturi

Éste es el caso que analizaremos de forma detallada usando la instalación del laboratorio con el objetivo de determinar las condiciones de contorno que dan lugar a la cavitación en estos particulares tubos.

Comenzamos describiendo la geometría de un Venturi: el tubo comienza con una zona convergente que conduce a la zona de menor diámetro, conocida como garganta; tras ésta, la zona divergente conecta de nuevo, de forma progresiva, al

diámetro inicial. En la Figura 2.14, podemos ver que los parámetros característicos son los siguientes:

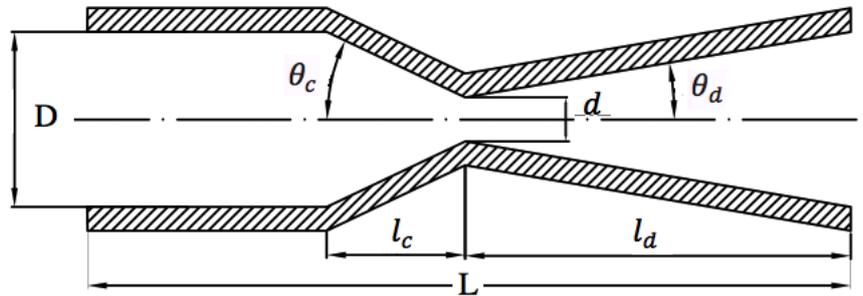


Figura 2.14: Parámetros geométricos característicos de un Venturi.

- La longitud total del Venturi viene dada por L ; además, distinguimos entre longitud de convergencia, l_c , y longitud de divergencia, l_d .
- Diámetro de entrada y salida del Venturi, D (normalmente es el mismo).
- Diámetro de la garganta, d .
- Ángulo de entrada al Venturi o de convergencia, θ_c , el cual suele estar comprendido entre los 15° y 20° . Esta reducción provoca una diferencia de presión entre la entrada al cono y la garganta del Venturi que puede ser usada para determinar el caudal circulante porque depende de la diferencia de presiones, es decir, $Q = f(\Delta P)$. Es por esto que se usan habitualmente como medidores de flujo.
- Ángulo de salida del Venturi o de divergencia, θ_d , el cual suele estar comprendido entre los 6° y 7° . En esta región la mayoría de la energía cinética es transformada en energía de presión como consecuencia de la progresiva apertura del cono la cual consigue que apenas existan pérdidas de carga.
- Los subíndices para referirnos a la entrada, garganta y salida del Venturi serán respectivamente: e, g y s.

Tras esta introducción a la geometría básica de un Venturi, vamos a comentar los dos modos de hallar el caudal circulante por un Venturi según el modo de funcionamiento: modo con cavitación y sin cavitación. Lo más común al usar un Venturi como medidor de flujo es tomar el salto de presiones más grande, es decir, la diferencia de presiones entre la entrada y la garganta del Venturi. A pesar de esto, en la mayoría de artículos de investigación relacionados con la cavitación en tubos de este tipo, toman la diferencia de presiones entre la entrada y la salida para el modo sin cavitación. A continuación, exponemos la deducción de las expresiones para el cálculo del caudal en ambos casos.

Comenzamos con la deducción del caudal para el modo sin cavitación. Partimos de la ecuación de Bernoulli entre la entrada y la salida del Venturi en condiciones ideales, es decir, sin pérdidas, la cual viene dada por,

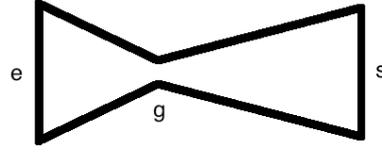


Figura 2.15: Venturi.

$$P_e + \frac{1}{2}\rho U_e^2 + \rho g h_e = P_s + \frac{1}{2}\rho U_s^2 + \rho g h_s \quad (2.13)$$

Si existen pérdidas, como es el caso, estas se introducen mediante la definición de una constante adimensional, K_p , la cual viene definida por la diferencia de energía mecánica entre la entrada y la salida dividida entre la presión dinámica en la entrada. La expresión de K_p es la siguiente,

$$K_p = \frac{(P_e + \frac{1}{2}\rho U_e^2 + \rho g h_e) - (P_s + \frac{1}{2}\rho U_s^2 + \rho g h_s)}{\frac{1}{2}\rho U_e^2} \quad (2.14)$$

donde $U_e = U_s$ ya que $A_e = A_s = A$, y al ser un tramo horizontal $h_e = h_s$. Aplicando estas simplificaciones a la ecuación anterior la K_p nos queda como,

$$K_p = \frac{P_e - P_s}{\frac{1}{2}\rho U_e^2} \quad (2.15)$$

de la cual podemos obtener el caudal multiplicando la velocidad por el área,

$$Q = A \sqrt{\frac{2(P_e - P_s)}{\rho \cdot K_p}} \quad (2.16)$$

donde K_p , como ya hemos dicho, es la constante de pérdidas de carga localizadas, las cuales corresponden en su mayoría a las producidas en la zona divergente del Venturi. En cambio, las pérdidas debidas a la fricción con las paredes son despreciable comparadas con las causadas por la geometría del Venturi ($\frac{\lambda U^2}{2D} D \ll \frac{\lambda U^2}{2D} L$).

Ahora, para el caso con cavitación partimos también de la ecuación de Bernoulli entre la entrada y la garganta del Venturi,

$$P_e + \frac{1}{2}\rho U_e^2 + \rho g h_e = P_g + \frac{1}{2}\rho U_g^2 + \rho g h_g \quad (2.17)$$

en este caso las pérdidas en la zona convergente son despreciables. Teniendo en cuenta que de nuevo $h_e = h_g$ y que $U_e A_e = U_g A_g$ obtenemos la siguiente expresión para el caudal¹,

¹En la práctica se suele incluir una simplificación adicional a esta expresión, que es la de considerar $A_g \ll A_e$ por lo que la expresión toma la siguiente forma, $Q = A_g \sqrt{\frac{2(p_e - p_g)}{\rho}}$.

$$Q = \sqrt{\frac{2(P_e - P_g)}{\rho \left(\frac{1}{A_g^2} - \frac{1}{A_e^2} \right)}} \quad (2.18)$$

Esta expresión también es válida y recomendable para el caso sin cavitación.

Igualando las expresiones (2.16) y (2.18) y operando llegamos a la siguiente relación de presiones,

$$\frac{P_s}{P_e} = 1 + \frac{K_p}{\left[\left(\frac{A_s}{A_e} \right)^2 - \left(\frac{A_s}{A_g} \right)^2 \right]} \left(1 - \frac{P_g}{P_e} \right) \quad (2.19)$$

Como norma $P_e \gg P_g$ y recordemos que $A_e = A_s$, por lo cual la expresión anterior queda reducida a,

$$\left(\frac{P_s}{P_e} \right)_{g,b} = 1 + \frac{K_p}{\left[1 - \left(\frac{A_e}{A_g} \right)^2 \right]} \quad (2.20)$$

La relación $(P_s/P_e)_{g,b}$ es aquella que bloquea la garganta del Venturi de forma que para valores mayores a esta relación la garganta no está bloqueada y, por el contrario, para valores menores la presión en la garganta es la de saturación del líquido provocando la cavitación que bloquea el caudal, el cual pasa a ser independiente de la presión aguas abajo.

A continuación, definimos la constante de presión [12], C_p , en la garganta del Venturi,

$$(C_p)_g = \frac{P_g - P_e}{\frac{1}{2}\rho U_e^2} \quad (2.21)$$

donde gracias de nuevo al teorema de Bernoulli, la variación de presión se puede expresar como,

$$P_g - P_e = \frac{1}{2}\rho (U_e^2 - U_g^2) \quad (2.22)$$

y, además, se sabe que el caudal es constante en todas las secciones e igual a $Q = UA$, por tanto, el coeficiente adimensional de presión puede describirse quedando en función de la sección de entrada, A_e , y de la garganta, A_g .

$$(C_p)_g = 1 - \left(\frac{A_e}{A_g} \right)^2 \quad (2.23)$$

Esta ecuación muestra la dependencia únicamente geométrica de la constante de presión, la cual no se ve alterada con la variación del caudal.

Por otra parte, ya sabemos que cualquier flujo tiene un σ determinado y, como se ha visto en el apartado 2.3, dependiendo del valor de esta constante adimensional con respecto a $(C_p)_g$ existirán o no, las condiciones necesarias para el desarrollo de la cavitación. La Figura 2.16, muestra la distribución de presiones longitudinal en un tubo de Venturi; está normalizada respecto a la presión aguas arriba, p_e , y respecto a su longitud total, L .

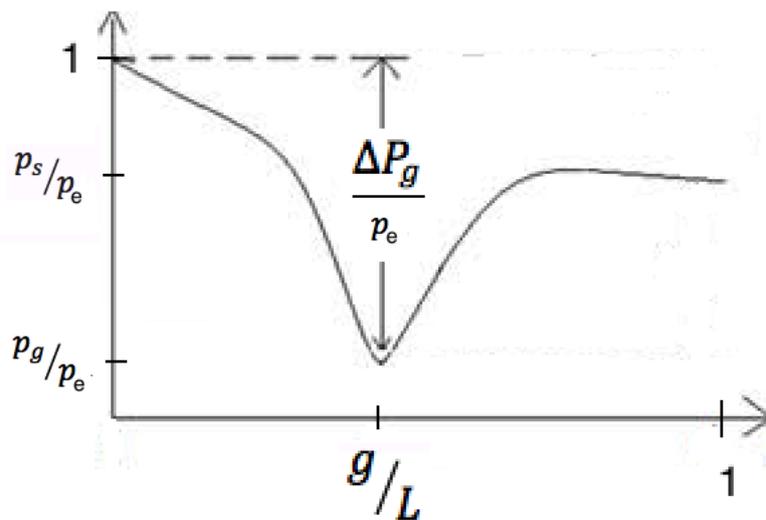


Figura 2.16: Campo longitudinal de presión en un tubo de Venturi.

El tramo que va desde la entrada del Venturi hasta la garganta está marcado por una fuerte caída de presión que no llega a recuperarse en la zona divergente debido a la fricción del fluido y a la geometría de la tubería, llegando a una presión P_s , la cual es siempre, por eficiente que sea el diseño, menor que la presión de entrada, P_e .

Volviendo a la imagen, se observa claramente que la zona de menor presión y, por consecuencia, con mayor probabilidad de cavitarse es la garganta del tubo de Venturi.

Aplicaciones de la cavitación en los tubos de Venturi. Las aplicaciones de la cavitación en estos estrechamientos son aquellas que implican una regulación del flujo. Comentamos algunos ejemplos [19]:

- Limitadores de flujo: si la diferencia de presión entre la entrada y la salida es lo suficientemente elevada, el flujo del Venturi pasaría del modo sin cavitación al modo con cavitación, pudiendo llegar a bloquearse la garganta y limitar así el flujo. Si únicamente se trabaja en el modo sin cavitación pueden usarse como medidores de flujo.

- Inyectores: con el vacío creado en la garganta podemos succionar abonos, combustible, pintura, gases, etc.
- Controladores de mezcla: son muy usados en motores de combustión, por ejemplo, cuando una cámara de combustión es alimentada de combustible y aire por dos líneas diferentes, como en el motor de un cohete, la relación de mezcla se mantendrá constante mientras la presión de la cámara de combustión esté por debajo de la de recuperación de los Venturis.
- Sistemas de extinción de fuegos: con el uso de Venturis conseguimos solucionar uno de los problemas críticos de estos sistemas que es conseguir una distribución homogénea del flujo en todas las líneas aunque alguna de ellas haya sufrido algún tipo de daño.

Capítulo 3

Descripción de la instalación experimental

Para el desarrollo experimental de este trabajo disponemos de un equipo de laboratorio, el cual ha sido diseñado con la finalidad de demostrar experimentalmente la conservación de la constante de Bernoulli.

Comenzamos con la descripción de la instalación.

3.1. Descripción del equipo

El equipo va montado sobre un panel horizontal de 600x900mm con cuadro de perfiles de aluminio. Sobre el panel tenemos el depósito, la bomba y la instalación.

El depósito consta de dos compartimentos, uno superior y otro inferior. El superior es utilizado para realizar lecturas volumétricas para la medida del caudal y como separador de aire cuando se realiza el vacío en el depósito inferior. El compartimento inferior es el depósito de aspiración en el que se puede modificar su presión.

El equipo dispone de una bomba que aspira del depósito e impulsa el líquido a través de la instalación, volviendo el mismo al punto de partida, con lo que tenemos un sistema de circuito cerrado. La medida del caudal se puede realizar tanto de forma volumétrica como con el diafragma existente a la salida de la bomba. Este diafragma tiene un rango de lectura de 800 a 2500 l/h.

Para la demostración del teorema de Bernoulli utilizamos un tubo de Venturi de sección circular a lo largo del cual tenemos una serie de tomas de presión conectadas a una batería de manómetros de columna de agua. Gracias al estrechamiento inicial y al posterior ensanchamiento del tubo de Venturi, podemos observar como la presión estática disminuye con la sección de paso y aumenta cuando ésta lo vuelve a hacer. Esta disminución de la presión, es medida por una batería de manómetros

de columna de agua que consta de un total de 6 tubos. Además dispone de un manómetro diferencial de mercurio para la medida del caudal en el diafragma. Para la regulación del caudal se utiliza una válvula de membrana que permite un ajuste fino del mismo.

En la garganta del Venturi de sección rectangular podemos conseguir una depresión suficiente como para observar el fenómeno de la cavitación. Para una correcta observación del mismo, se ha construido el Venturi de metacrilato. El equipo cuenta además con un manómetro y un vacuómetro con los que podemos medir las sobrepresiones y depresiones producidas. También es posible cambiar las condiciones de presión en el depósito de aspiración, con lo que tenemos la oportunidad de estudiar el fenómeno para diferentes caudales y presiones.

3.2. Esquema de la instalación

Para realizar un análisis claro de la instalación se ha representado en un esquema (Figura 3.1 en la página siguiente) los puntos característicos del sistema (venturi, depósito, etc). Así será más fácil realizar referencias a cualquier parte de la instalación.

LISTADO DE PUNTOS CARACTERÍSTICOS.

- Punto 0: fondo del depósito.
- Punto 1: aspiración de la bomba.
- Punto 2: impulsión de la bomba.
- Punto 3: entrada a la zona convergente del Venturi.
- Punto 4: garganta del Venturi.
- Punto 5: salida de la zona divergente del Venturi.
- Punto 6: aguas arriba del diafragma.
- Punto 7: aguas abajo del diafragma.
- Punto 8a: retorno superior al depósito.
- Punto 8b: retorno inferior al depósito.

3.3. Elementos de la instalación

En esta sección describiremos los elementos y sus características más importantes.

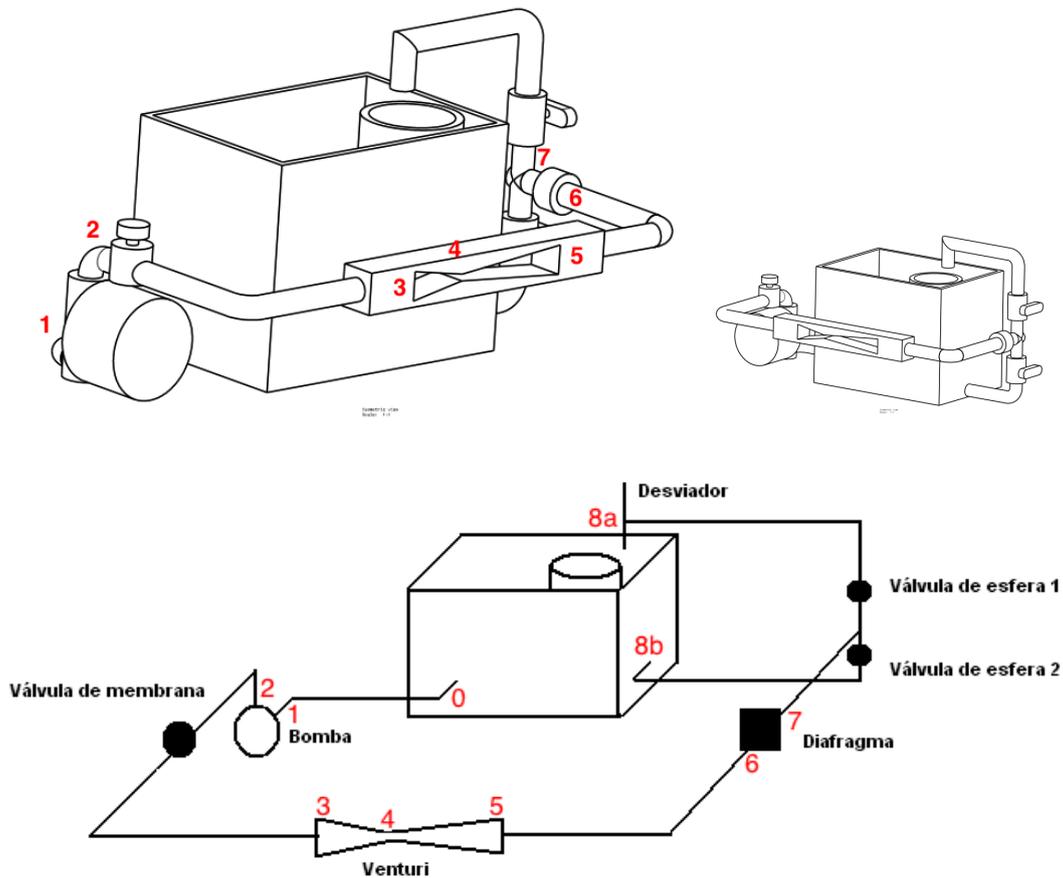


Figura 3.1: Esquemas de la instalación.

Bomba centrífuga(Figura 3.2 en la página siguiente) Pequeño equipo hidráulico que se encarga de succionar el agua del depósito y bombearla a toda la instalación. Especificaciones técnicas:

- Caudal: $20 \div 120$ l / min
- Altura: $22 \div 9$ m
- Tensión: $220 \div 230$ V
- Potencia: 0,6 kW
- Régimen de giro: 2900 rpm

Cuenta con tomas de presión en la aspiración e impulsión para comprobar la diferencia de presiones que genera; éstas nos servirán para obtener la curva característica de la bomba más adelante.

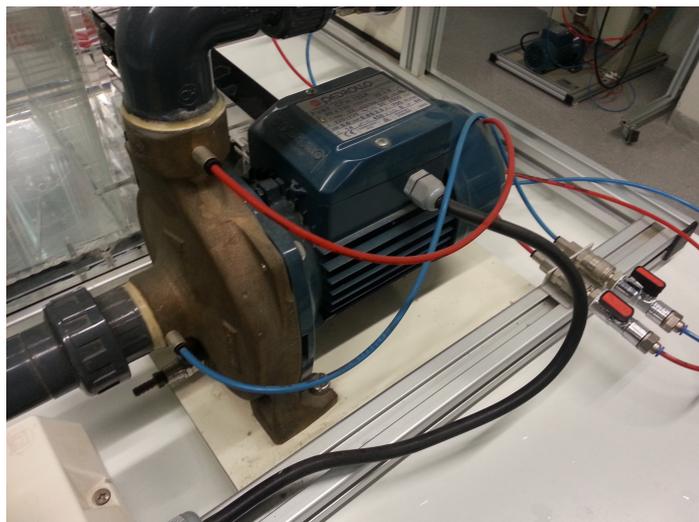


Figura 3.2: Bomba centrífuga de la instalación.

Tubería de PVC La tubería completa es de PVC. La aspiración y un tramo de la impulsión es de tubería de 32 mm de exterior y 27,2 mm de interior; en cambio, la impulsión, a partir de la válvula de membrana, y el resto de la red tiene un diámetro exterior de 25 mm y un interior de 21,2 mm. El equipo cuenta con una sola línea que se bifurca tras el diafragma para ser desviada al depósito superior o al inferior. En la siguiente tabla recogemos los parámetros más importantes de nuestra tubería.

	Diámetro exterior(mm)	Diámetro interior(mm)	Rugosidad absoluta(ε [mm])	Longitud(m)
ASPIRACIÓN	32	27,2	0,0015	0,15
IMPULSIÓN	25	21,2	0,0015	1,015

Cuadro 3.1: Parámetros físicos de la tubería de PVC

Las pérdidas por fricción pueden ser considerables por lo que vamos a determinar cuales son los coeficiente de fricción, λ , para cada tubería con los distintos caudales usados en los ensayos. Este coeficiente es función del número de Reynolds y de la geometría de la sección. Se puede obtener fácilmente del diagrama de Moody[18].

Q(l/min)	12,81	21,6	27,73	32,32	36,65	40,89	44,14	47,24	ε/D_{int}
λ tubería 32 \varnothing	0,03099	0,02727	0,02553	0,02462	0,02391	0,02331	0,02291	0,02256	$5,5147 \cdot 10^{-5}$
Reynolds	9,97E+03	1,65E+04	2,16E+04	2,52E+04	2,85E+04	3,18E+04	3,44E+04	3,68E+04	$\lambda = 0,02514$

Q(l/min)	12,81	21,6	27,73	32,32	36,65	40,89	44,14	47,24	ε/D_{int}
λ tubería 25 \varnothing	0,02908	0,02569	0,02411	0,02328	0,02263	0,02209	0,02173	0,02141	$7,0755 \cdot 10^{-5}$
Reynolds	1,28E+04	2,11E+04	2,77E+04	3,23E+04	3,66E+04	4,08E+04	4,41E+04	4,72E+04	$\lambda = 0,02375$

Cuadro 3.2: Coeficientes de pérdidas en la tubería de PVC.

En vista de las pequeñas variaciones que sufre el coeficiente λ en cada tubería para los distintos caudales sería práctico tomar su valor medio para simplificar el cálculo de las pérdidas de la instalación que se realizará más adelante.

Además en la tubería existen otros elementos: codos, T's y cambios de sección bruscos. En la siguiente tabla recogemos sus parámetros físicos obtenidos de la bibliografía[15].

	Codo 25Ø / 90º	Codo 30Ø / 90º	T	Estrechamiento suave	Ensanchamiento suave
K_p	1,12	1,12	1,2	0	0,88
Dimensiones	21,2 mm	27,2 mm	21,2 mm	$L/D \gg 1$	$\varphi \approx 60^\circ ; D/d \approx 3,5$

Cuadro 3.3: Parámetros físicos de elementos(codos,T,...).

Se ha comprobado experimentalmente que el ensanchamiento no introduce pérdidas significativas. Esto puede deberse a que la geometría no es la misma que aparece en la bibliografía puesto que nuestro ensanchamiento suave va de una sección rectangular a una sección circular. Por tanto, para los cálculos omitiremos estas pérdidas.

Válvula de membrana(Figura 3.4 en la página siguiente) Se encuentra a una corta distancia de la impulsión de la bomba. Este tipo de válvulas son apropiadas para el control de flujo ya que permite una regulación precisa de éste agregando una caída de presión pequeña. Es aquí donde se produce el cambio de sección de tubería de 32Ø a 25Ø.

En la siguiente tabla se recoge los parámetros más importantes de este elemento. La constante de pérdidas para la válvula abierta aparece en la bibliografía adjunta[15].

Diámetro interior	$K_p(abierta)$
27,2 mm	0,12

Cuadro 3.4: Parámetros físicos de la válvula de membrana.

La constante de pérdidas varía según el nivel de apertura de la válvula. La Figura 3.3 ha servido para cuantificar este parámetro.

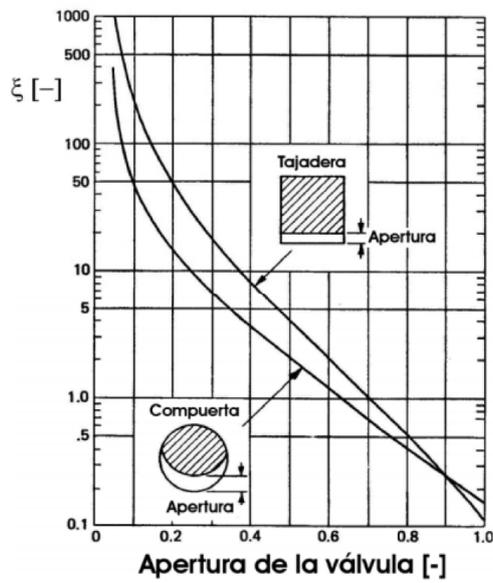


Figura 4. Válvulas de compuerta y de tajadera o guillotina. Coeficiente de pérdidas de carga en función del ángulo de apertura. Fuente: Miller

Figura 3.3: Coeficiente de pérdidas de carga en función del ángulo de apertura. Fuente: Miller.

Hay que dejar claro que los datos de la bibliografía nos dan una estimación del valor de la constante y como varía con el grado de apertura, pero no los valores reales.



Figura 3.4: Válvula de membrana de la instalación.

Válvula de bola(Figura 3.6 en la página siguiente) Se dispone de dos válvulas de este tipo(sin reducción de área) que tienen la finalidad de desviar el flujo al depósito superior o al inferior. La constante de pérdidas en este caso es aproximadamente $K_p = 0,1$ cuando la válvula está abierta.

En la siguiente gráfica mostramos un gráfico que representa esta constante de pérdidas en función del ángulo de apertura.

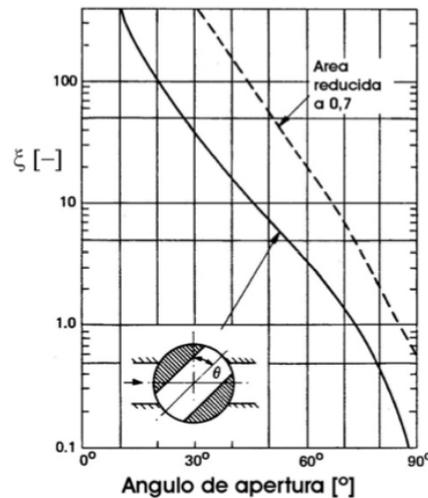


Figura 1. Válvulas de bola con y sin reducción de diámetro respecto de la entrada. Coeficiente de pérdidas de carga en función del ángulo de apertura. 90° = abierta. Fuente: Miller

Figura 3.5: Constante de pérdidas de una válvula de bola.

Manómetro diferencial de mercurio(Figura 3.7 en la página siguiente) La instalación cuenta con dos tomas para este manómetro particular que permite medir las diferencias de presiones más grande, por ejemplo, en el diafragma. La máxima diferencia de presión medible son 60 cm Hg.

Batería de manómetros de agua(Figura 3.7 en la página siguiente) Se trata de 6 tubos conectados entre sí con sus correspondientes 6 tomas, las cuales pueden medir como máximo una diferencia de 0,6 m.c.a. Es idóneo para observar la distribución de presiones en el Venturi de sección circular.

Manómetro y vacuómetro tipo Bourdon(Figura 3.8 en la página 33) Este tipo de manómetros se aprovechan del cambio de forma de un tubo metálico, aplastado y hermético enrollado en espiral cuando se lo somete a presión. El manómetro puede medir una presión de 25 m.c.a y el vacuómetro -76 cm Hg, es decir, uno mide presiones por encima de la atmosférica y el otro por debajo. Por su amplio rango de

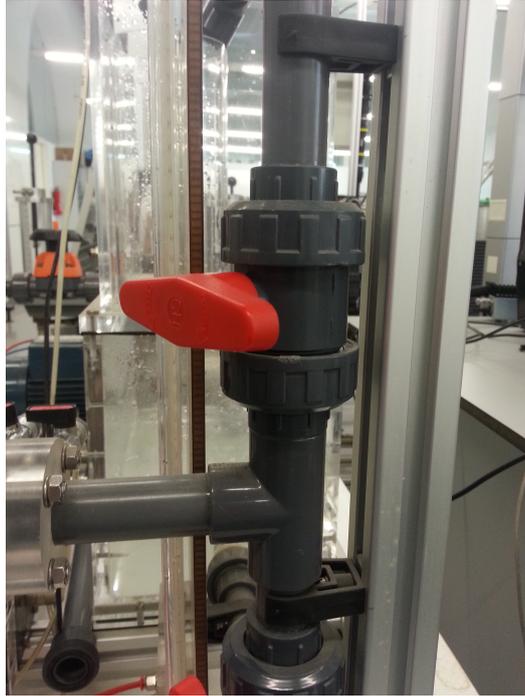


Figura 3.6: Válvulas de bola de instalación.



Figura 3.7: Manómetro diferencial de mercurio(izq.) y batería de manómetros de agua(der.) de la instalación.

medida serán los elementos que usaremos para medir la presión aguas arriba y en la garganta del Venturi de sección rectangular cuando analicemos la cavitación.



Figura 3.8: Manómetro y vacuómetro de la instalación.

Tubo de Venturi(Figura 3.9 en la página siguiente) El equipo experimental viene equipado con dos tubos de Venturi, uno de sección circular para el análisis del efecto Venturi y otro de sección rectangular para la observación de la cavitación.

El Venturi que usaremos en la fase experimental de este trabajo es el de sección rectangular ya que es posible alcanzar las condiciones para que se desarrolle la cavitación. En la siguiente tabla recogemos los datos más importantes.

$L(cm)$	$l_c(cm)$	$l_d(cm)$	Dxe	dxe	θ_c	θ_d
41	5	16,5	25 x 6 mm	6 x 6 mm	14 ^o	4,3 ^o

Cuadro 3.5: Parámetros del Venturi rectangular.

No olvidemos que se trata de un Venturi de sección rectangular y que por tanto, Dxe y dxe indican la altura(D , d) de la sección por el espesor(e).

Por último, el coeficiente de pérdidas del Venturi es $K_p = 2,44$, cuyos cálculos aparecen más adelante.

Diafragma(Figura 3.10 en la página 35) Su finalidad es la de medir el caudal circulante en la instalación. En concreto, nuestro diafragma es de tipo circular, es decir, su orificio es redondo. Su diámetro mínimo es de 13 mm.

En la bibliografía [15] se ha encontrado una correlación para este tipo de elemento donde las tomas de presión se encuentran un diámetro aguas arriba y medio diámetro

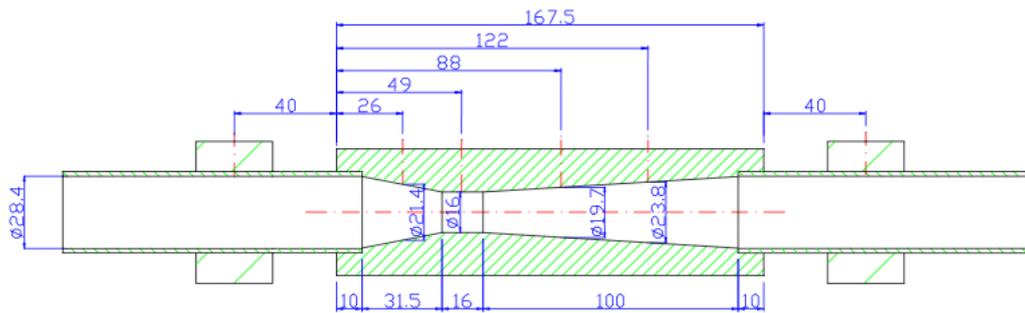
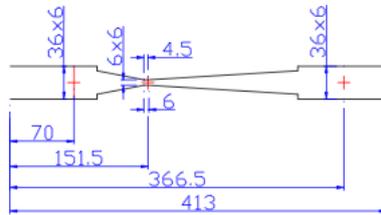


Figura 3.9: Geometría y tubos de Venturi de la instalación.

aguas abajo. En cambio, en nuestro diafragma ambas tomas se encuentran a un diámetro de distancia. Aun así, lo hemos calculado con esta correlación obteniendo el siguiente valor para K_d .

d_{min}	d/D	K_d
13 mm	0,613	9,88

Cuadro 3.6: Parámetros físicos del diafragma.

Depósitos(Figura 3.12 en la página 36) En el depósito inferior hay varias conexiones: la aspiración de la bomba, el retorno y la comunicación con el depósito superior; además, dispone de una válvula o conexión rápida en la zona lateral para

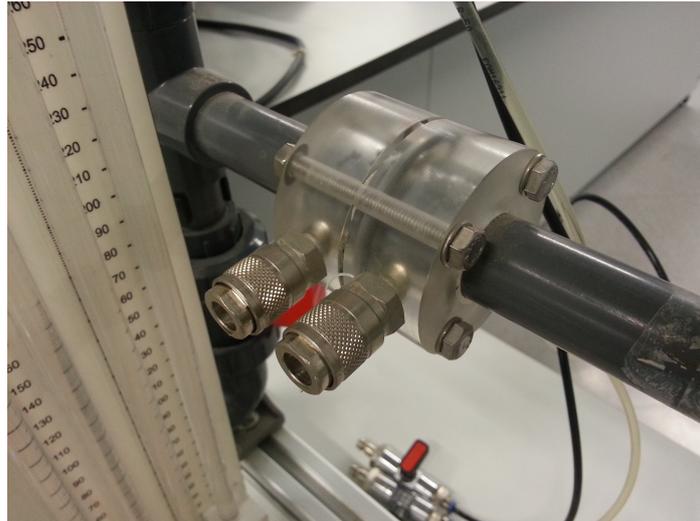


Figura 3.10: Geometría y diafragma de la instalación.

poder hacer vacío en él. Por otro lado, el depósito superior está abierto por su parte alta, y se divide en depósito calibrado y depósito de derivación. Ambos están conectados al depósito inferior y pueden aislarse de éste mediante el uso de unos tapones que lo sellan. El depósito calibrado sirve para la medida de caudal, y el de derivación para evitar vaciar el depósito inferior mientras se mide el caudal.

En la Figura 3.11 en la página siguiente aparecen señaladas las partes del depósito nombradas en el párrafo anterior con el fin de comprender mejor el funcionamiento de los depósitos ya que más adelante(en los ensayos experimentales) se usará esta nomenclatura.

Las distintas configuraciones de estos depósitos serán explicadas detalladamente más adelante.

Desviador de flujo(Figura 3.13) Se trata de una prolongación de la tubería en su parte final que gira, permitiendo guiar el fluido hacia uno de los depósitos superiores.

Interruptor de puesta en marcha y paro(Figura 3.14) Dispositivo eléctrico que cuenta con un botón de marcha y una parada de emergencia cumpliendo con los requisitos de seguridad.

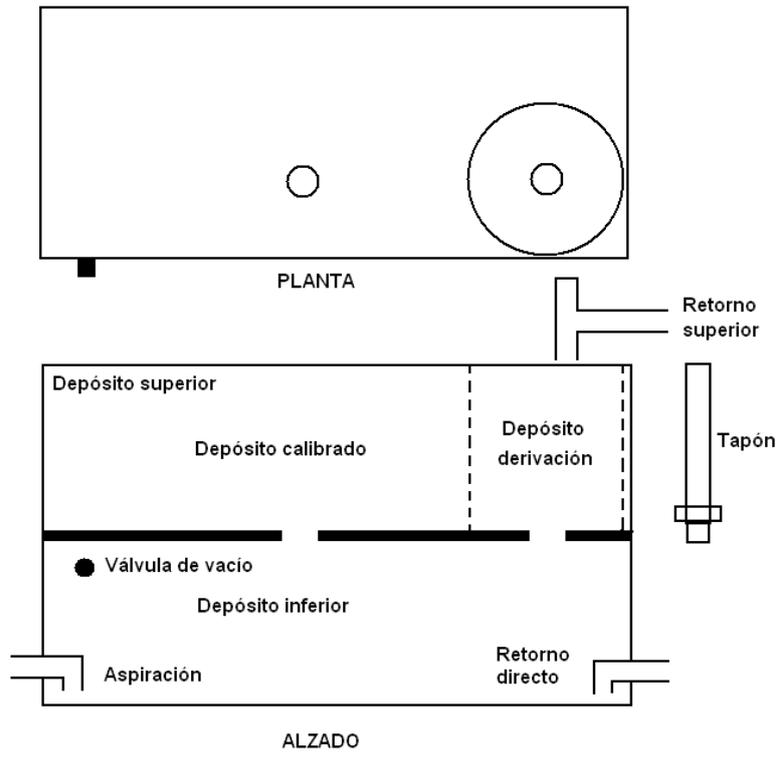


Figura 3.11: Esquema de los depósitos.

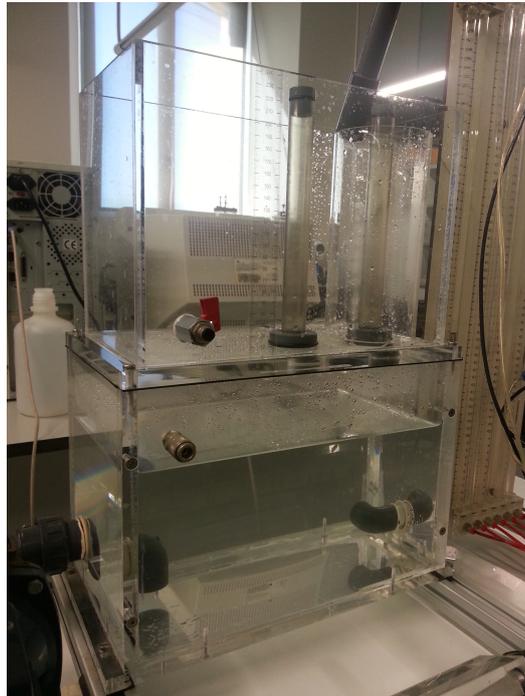


Figura 3.12: Depósitos de la instalación.

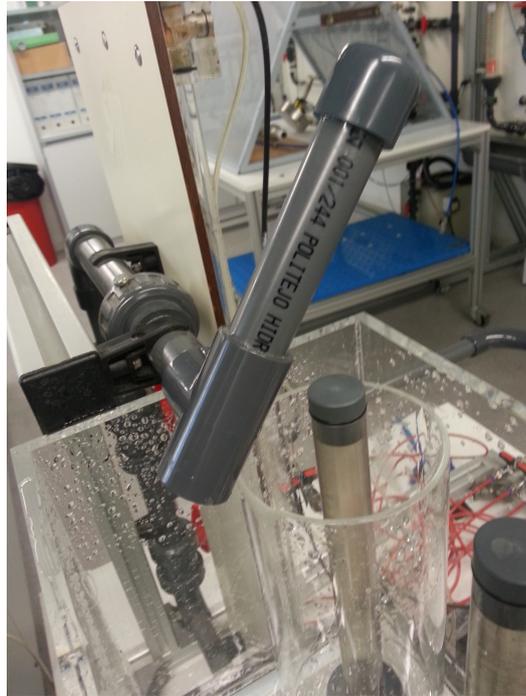


Figura 3.13: Desviador de flujo de la instalación.

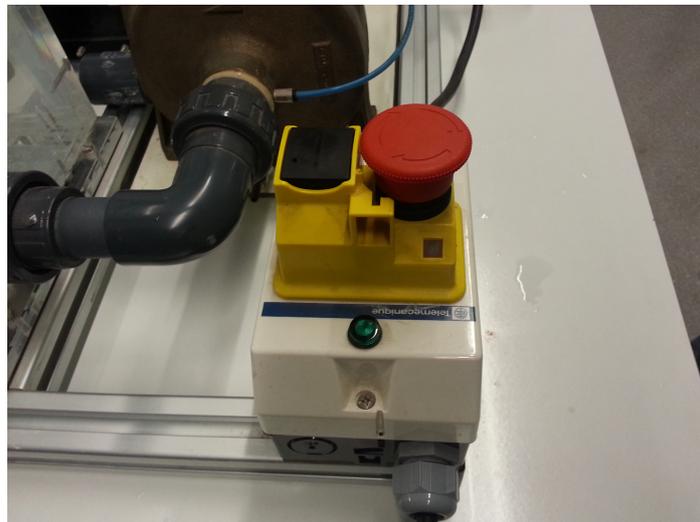


Figura 3.14: Interruptor de la instalación.

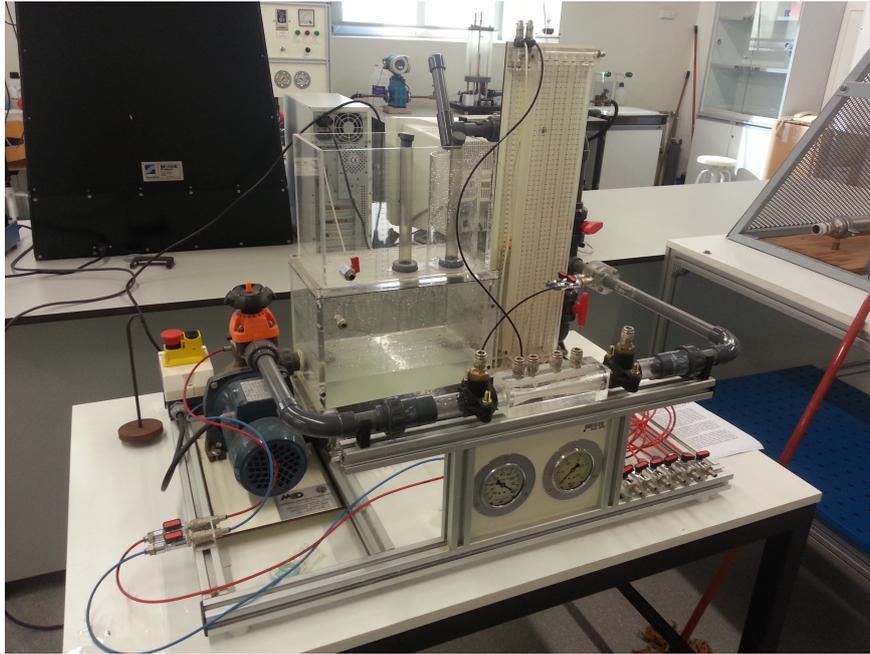


Figura 3.15: Instalación experimental.

3.4. Puesta en marcha de la instalación

Antes de comenzar con cualquier ensayo se deberán seguir estas indicaciones:

1. Si el depósito inferior se encuentra vacío, lo llenaremos como mínimo a una altura que cubra por completo la aspiración de la bomba (el nivel máximo deberá estar por debajo de la válvula de vacío).
2. Abrimos completamente las válvulas de retorno al depósito y de impulsión para cebar la bomba. Tras unos segundos cerramos la de impulsión.
3. Ya estamos preparados para la puesta en marcha de la bomba. Una vez presionemos el botón de arranque abrir la válvula de impulsión progresivamente dejando salir las posibles bolsas de aire y estabilizando el flujo.

Es muy importante seguir estos pasos para evitar una avería en la bomba por trabajo en seco. También es aconsejable que si no se va a usar el manómetro diferencial de mercurio cerremos las válvulas que lo conectan a la instalación para evitar que un despiste acabe contaminando el depósito.

3.5. Configuraciones de funcionamiento.

Existen varios modos para caracterizar la instalación y obtener así, el coeficiente de descarga del diafragma o la curva característica de la bomba entre otros parámetros. Durante las sesiones de laboratorio se han seguido básicamente dos tipos de configuraciones que se explican a continuación.

CONFIGURACIÓN A(Figura 3.16 en la página siguiente). Ésta es la configuración usada para estas situaciones:

- Determinar el coeficiente de descarga del diafragma.
- Medir el caudal circulante con el depósito calibrado.

La posición de las válvulas es la siguiente:

- Válvula de membrana: apertura progresiva para controlar el caudal.
- Válvula de esfera 1(dep. superior): abierta.
- Válvula de esfera 2(dep. inferior): cerrada.

Con esta configuración de las válvulas guiamos el caudal al depósito superior. Usando el desviador de flujo llevamos el agua al depósito calibrado o al de derivación. El estado de los depósitos es:

- Depósito calibrado: aislado del inferior. Se comunican una vez medido el volumen de agua para comenzar una nueva medida.
- Depósito de derivación: está conectado al inferior. El flujo se dirige hacia éste mientras no se realicen medidas volumétricas en el depósito calibrado.

Resumen: la bomba aspira del depósito inferior, la impulsa por la instalación hasta el depósito superior donde puede ser guiada al depósito calibrado para la medida de caudal o al depósito de derivación que se conecta con el inferior.

CONFIGURACIÓN B(Figura 3.17 en la página siguiente). En cambio, esta configuración se usa para:

- Obtener la curva característica de la bomba.
- Estudiar el fenómeno de la cavitación en el tubo de Venturi.

El estado de las válvulas es el siguiente:

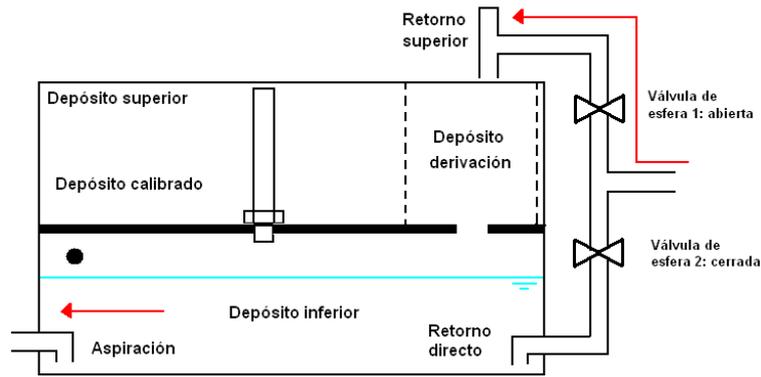


Figura 3.16: Configuración A.

- Válvula de membrana: apertura progresiva para controlar el caudal.
- Válvula de esfera 1(dep. superior): cerrada.
- Válvula de esfera 2(dep. inferior): abierta.

Con esta configuración de las válvulas guiamos el caudal al depósito inferior. Los depósitos están comunicados entre sí lo que permite variar la altura de la columna de agua desde un valor mínimo de 6 cm(necesarios para cubrir la aspiración) hasta un máximo de 0,5 m. Esta altura está determinada por el objetivo del ensayo: si queremos retrasar la cavitación, la altura de agua debe ser máxima y, si por el contrario, el objetivo es adelantarla, la altura debe ser mínima.

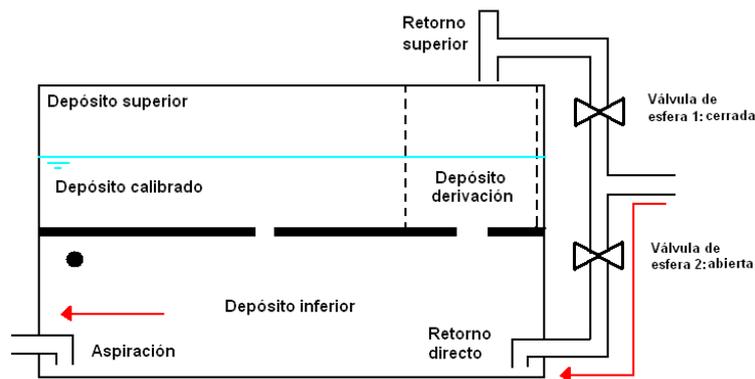


Figura 3.17: Configuración B.

Resumen: el caudal aspirado del depósito circula por la instalación hasta el mismo depósito inferior. El caudal circulante se determina mediante la diferencia de presiones en el diafragma.

CONFIGURACIÓN C(Figura 3.18). Ésta es la configuración usada para estas situaciones:

- Disminuir la presión en el depósito inferior con el objetivo de adelantar la cavitación.

La posición de las válvulas es la siguiente:

- Válvula de membrana: apertura progresiva para controlar el caudal.
- Válvula de esfera 1(dep. superior): cerrada.
- Válvula de esfera 2(dep. inferior): abierta.

Con esta configuración de las válvulas guiamos el caudal al depósito inferior. El estado de los depósitos es:

- Depósito calibrado: aislado del inferior.
- Depósito de derivación: aislado también del inferior.

El aislamiento de los depósitos se consigue mediante los dos tapones que incorpora la instalación.

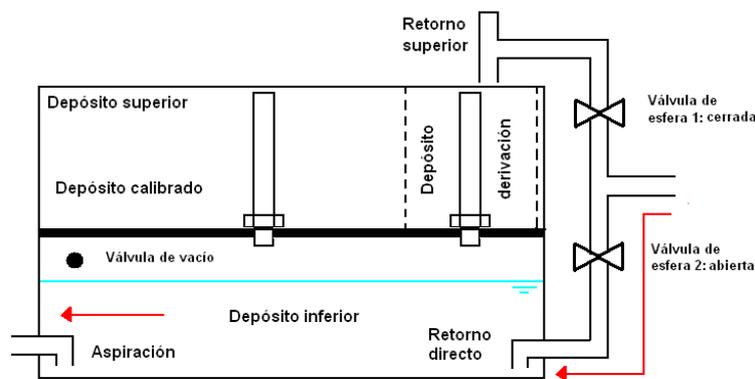


Figura 3.18: Configuración C.

Resumen: la bomba aspira del depósito inferior, la impulsa por la instalación de vuelta al depósito inferior donde con una bomba de vacío se consigue disminuir la presión a través de la válvula de vacío con el objetivo de adelantar la cavitación.

Esta configuración no se ha llegado a usar debido a que el depósito inferior presentaba fugas en la zona alta por lo que ha resultado imposible disminuir la presión.

3.6. Cálculo del caudal

La instalación experimental cuenta con varias técnicas para obtener el caudal circulante gracias al depósito calibrado, diafragma, curva característica de la bomba y al propio Venturi. El objetivo de conocer el caudal es con el propósito de determinar su velocidad, y por tanto, conocer la presión dinámica del flujo, la cual es un término imprescindible para el estudio de la cavitación. En las siguientes secciones se expondrán los fundamentos teóricos de estos métodos de medición de flujos y el procedimiento seguido en el laboratorio.

3.6.1. Caracterización del diafragma

3.6.1.1. Coeficiente de descarga y de pérdidas.

Si planteamos en el diafragma la ecuación de Bernoulli, estando el punto 1 aguas arriba y 2 aguas abajo(Figura 3.19), obtenemos que la velocidad teórica es,

$$v_{2t} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{2 \frac{(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (3.1)$$

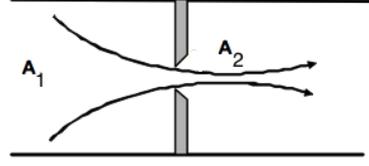
sabiendo que el caudal se conserva, $Q = v_1 A_1 = v_2 A_2$. Recordar que si la diferencia de presión, $P_2 - P_1$, se expresa en diferencia de metros de columna de agua, Δh , la expresión cambia a,

$$v_{2t} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{2g\Delta h} \quad (3.2)$$

Normalmente 1 se encuentra a un diámetro de distancia del orificio y 2 a medio diámetro intentado coincidir con la sección mínima de la vena contracta [15]. En nuestro caso ambos se encuentran aproximadamente a 25 mm. Añadir que A_2 no es la sección mínima generada por el efecto de la vena contracta sino que la tomamos como la sección mínima de paso del diafragma por ser esta un valor conocido; a cambio, intentaremos corregir esta aproximación de la forma que comentamos en el párrafo siguiente.

Para que la velocidad sea la real tendremos que tener en cuenta las consecuencias provocadas por el efecto de la vena contracta con el coeficiente de contracción, C_c , y de la turbulencia y viscosidad con el coeficiente de velocidad, C_v . El producto de estos dos coeficientes adimensionales es conocido como coeficiente de descarga, C_d . Es fácil demostrar que este parámetro adimensional es función de la geometría y del número de Reynolds[18].

La forma de calcular este parámetro es estrictamente experimental; los datos empíricos se han tabulado en gráficas y, también, se han establecido correlaciones numéricas para un cálculo más preciso, las cuales aparecen en cualquier bibliografía básica sobre el tema [18] o en normas [10].



Resumiendo, la velocidad real en el diafragma quedaría expresada como,

Figura 3.19: Esquema de un diafragma.

$$v_{2r} = \frac{C_d}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{2g\Delta h} \quad (3.3)$$

y el caudal real se obtiene multiplicando por la sección.

$$Q_r = \frac{C_d A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{2g\Delta h} \quad (3.4)$$

Como queremos determinar el coeficiente de descarga, lo despejamos de la expresión anterior donde el caudal lo hallaremos mediante el uso del depósito calibrado.

$$C_d = \frac{Q_r}{A_2 \sqrt{2g\Delta h}} \sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2} \quad (3.5)$$

Por tanto, durante los ensayos tendremos que medir el cambio de presión a ambos lados del diafragma expresándolo en m.c.a y el caudal real con el depósito calibrado, además de conocer la geometría del diafragma. Cuando hayamos determinado experimentalmente y verificado con la bibliografía el coeficiente de descarga, estaremos en condiciones de determinar el caudal para cualquier configuración aplicando la ecuación 3.4.

Otro parámetro importante en la caracterización de un diafragma es la pérdida de presión que genera. Este valor se puede cuantificar mediante un parámetro adimensional que se calcula como la variación de presión experimentada al atravesar el diafragma entre la presión dinámica del flujo en la sección grande. Entonces el cálculo de este parámetro es,

$$K_d = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (3.6)$$

Esta variación de presión tendría que tomarse varios centímetros aguas arriba y abajo del diafragma para poder calcular la pérdida de presión definitiva que incorpora el diafragma, y no la pérdida de presión local que sirve, únicamente, para el cálculo del caudal. Esto no ha sido posible por las limitaciones de la instalación puesto que no se dispone de tomas de presión por debajo del punto 7.

El hecho de suponer que el salto de presión a un diámetro de distancia aguas arriba y abajo del diafragma es igual al salto de presión que existe a varios centímetros aguas arriba y abajo de éste, es partir de la hipótesis de que la presión estática no se recupera, cosa que no es totalmente cierta. Por tanto, vamos a adoptar el valor de K_d impuesto en la bibliografía, el cual aparece en la sección 3.3 y que más tarde modificaremos, si fuera necesario, para ajustar el modelo analítico.

Por otra parte, como hemos usado la sección grande de la tubería para adimensionalizar el salto de presión, lo lógico es, que en el modelo analítico de distribución de presiones que se desarrollará más adelante se use esta sección, en vez de la mínima, cuando agreguemos la pérdida definitiva generada por el diafragma.

3.6.1.2. Modo de operación

Para la toma de datos seguimos los siguientes pasos:

1. En primer lugar, seguimos las indicaciones de la sección 3.4 en la página 38, Puesta en marcha de la instalación. Estas medidas se llevarán a cabo con el tramo recto de tubo de PVC en la posición normal del Venturi, tal y como se muestra en la Figura 3.20.

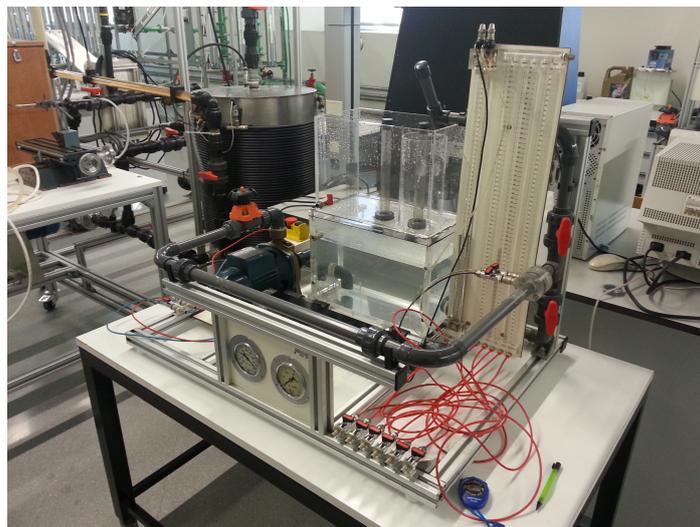
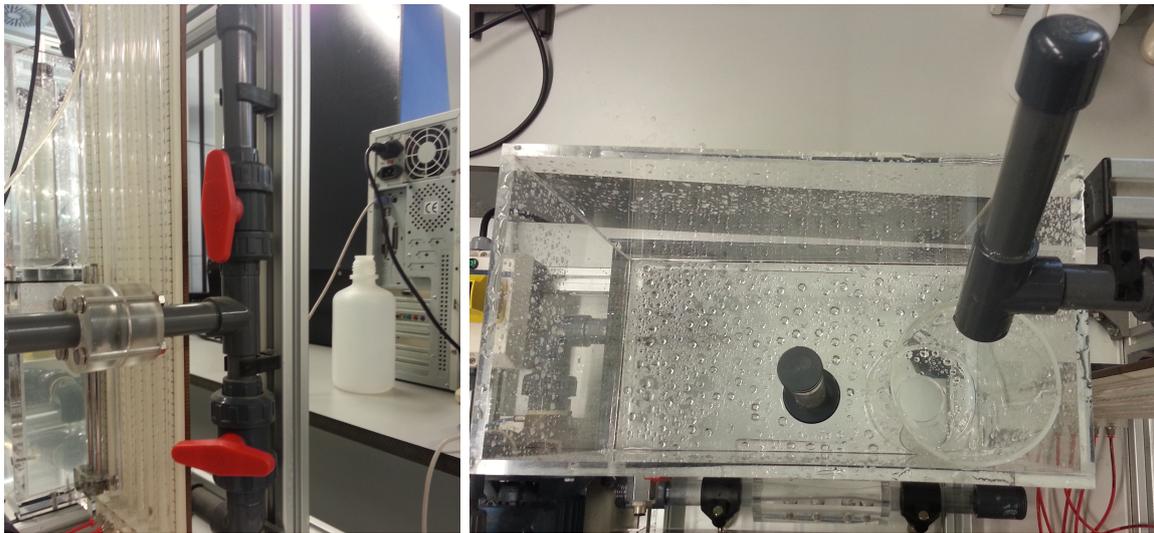


Figura 3.20: Instalación con tramo recto de PVC.

2. Conectamos las tomas de presión al manómetro diferencial de mercurio o a los de tipo Bourdon dado que las diferencias de presión en el diafragma, por lo general, son grandes. Si se decide usar el de mercurio, hay que extremar la precaución y variar el caudal lentamente para evitar que un salto de presión excesivo provoque la entrada de mercurio al circuito de agua.
3. Debemos retirar el tapón del depósito de derivación y colocarlo en el depósito calibrado para aislarlo del inferior. Tras esto, guiamos el flujo al depósito de derivación colocando para ello las válvulas de bola y el desviador de flujo como aparece en la Figura 3.21(Configuración A).



(a) Flujo guiado hacia el depósito superior.

(b) Desviador hacia el depósito de derivación.

Figura 3.21: Posición de las válvulas de bola y desviador para el paso 3.

4. Usando la válvula de membrana fijamos un caudal.
5. Tomamos las medidas en los manómetros correspondientes.
6. A la vez que desviamos el flujo al depósito calibrado usando el desviador activamos el cronómetro y esperamos unos segundos hasta llenar un cierto volumen el depósito calibrado. Se debe evitar vaciar el depósito inferior por debajo del nivel de la aspiración para que la bomba no aspire aire. Al mismo tiempo que paramos el cronómetro, redirigimos el caudal al depósito de derivación.
7. Dejamos que el agua se estabilice en el depósito calibrado y tomamos el valor de la altura.

8. Repetimos 4, 5, 6 y 7 hasta llegar a una apertura total de la válvula. Con el manómetro de mercurio no se puede llegar a una apertura total por el motivo comentado anteriormente.

3.6.1.3. Toma de datos y cálculos

Datos experimentales Siguiendo las indicaciones anteriores se han recogido los siguientes datos:

	Depósito calibrado		Manómetro de Hg	
	Altura(mm)	Tiempo(s)	H_1 (mm)	H_2 (mm)
1	96	5,06	30	427
2	111	6,47	60	404
3	114	7,41	90	374
4	120	8,4	120	344
5	112	9,12	150	314
6	122	13,03	180	283
7	124	20,47	210	254
8	125	27,35	220	242
9	133	7,28	30	427
10	129	7,53	60	404
11	119	7,65	90	374
12	126	9,12	120	344
13	127	10,9	150	314
14	124	13,34	180	283
15	125	20,97	210	254
16	123	28	220	242

Tabla 3.7: Datos recogidos del diafragma.

Cálculos En la siguiente tabla se muestran las constantes físicas y geométricas que se han considerado para estos cálculos.

Parámetros geométricos y físicos		
Diámetro(D):	21,2	mm
diámetro(d_d)	13	mm
Densidad agua(ρ)	998	kg/m^3
Viscosidad dinámica(μ)	0,001	Ns/m^2
Densidad mercurio(ρ_{Hg})	13579,04	kg/m^3

Tabla 3.8: Parámetros geométricos y físicos.

Como la dimensiones de la base del depósito las conocemos(325x175 mm), se ha calculado su área a la cual se le ha restado el área del depósito de derivación y al multiplicar este valor por la altura obtenemos el volumen.

Las diferencias de alturas en milímetros de mercurio se han pasado a metros de columna de agua aplicando la siguiente relación de conversión, $\Delta H_{m.c.a.} = \Delta H_{mm\ Hg} \frac{\rho_{Hg}}{\rho}$.

Para obtener el numero adimensional de Reynolds se aplica que $Re_D = \frac{\rho U D}{\mu} = \frac{\rho(Q/A_2)D}{\mu}$ siendo Q y A_2 , respectivamente, el caudal y el área mínima del diafragma.

	D. Calibrado	Manómetro de Hg		Reynolds
	Caudal(Q en l/s)	$H_1 - H_2$ (mmHg)	$H_1 - H_2$ (m.c.a.)	Re_D
1	0,93	397	5,40	5,57E+04
2	0,84	344	4,68	5,04E+04
3	0,75	284	3,86	4,52E+04
4	0,70	224	3,05	4,20E+04
5	0,60	164	2,23	3,61E+04
6	0,46	103	1,40	2,75E+04
7	0,30	44	0,60	1,78E+04
8	0,22	22	0,30	1,34E+04
9	0,90	397	5,40	5,37E+04
10	0,84	344	4,68	5,03E+04
11	0,76	284	3,86	4,57E+04
12	0,68	224	3,05	4,06E+04
13	0,57	164	2,23	3,42E+04
14	0,46	103	1,40	2,73E+04
15	0,29	44	0,60	1,75E+04
16	0,22	22	0,30	1,29E+04

Tabla 3.9: Caudales, diferencias de alturas y n^0 de Reynolds en el diafragma.

Si recuperamos la ecuación 3.5 en la página 43,

$$C_d = \frac{Q_r}{A_2 \sqrt{2g\Delta h}} \sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2} \quad (3.7)$$

ya disponemos de todos los parámetros de la expresión para calcular el coeficiente de descarga. En la Tabla 3.10 se han calculado cada uno de ellos para cada caudal. Con el coeficiente de descarga medio se ha recalculado usando la ecuación 3.4 el caudal y se han comparado ambos resultados obteniendo errores relativos menores del 5%.

	D. Calibrado		Usando la ecuación 3.7	
	Caudal(Q en l/s)	$C_{d\ exp}$	Caudal(Q en l/s)	Error relativo
1	0,93	0,63	0,91	2,45 %
2	0,84	0,61	0,84	0,42 %
3	0,75	0,60	0,77	1,74 %
4	0,70	0,63	0,68	2,69 %
5	0,60	0,64	0,58	3,14 %
6	0,46	0,61	0,46	0,68 %
7	0,30	0,60	0,30	1,71 %
8	0,22	0,65	0,21	4,68 %
9	0,90	0,61	0,91	1,30 %
10	0,84	0,61	0,84	0,56 %
11	0,76	0,61	0,77	0,63 %
12	0,68	0,61	0,68	0,62 %
13	0,57	0,60	0,58	2,09 %
14	0,46	0,61	0,46	1,41 %
15	0,29	0,60	0,30	3,36 %
16	0,22	0,62	0,21	0,82 %
	$\bar{C}_{d\ exp}$	0,62		

Tabla 3.10: Coeficientes de descarga del diafragma y errores relativos.

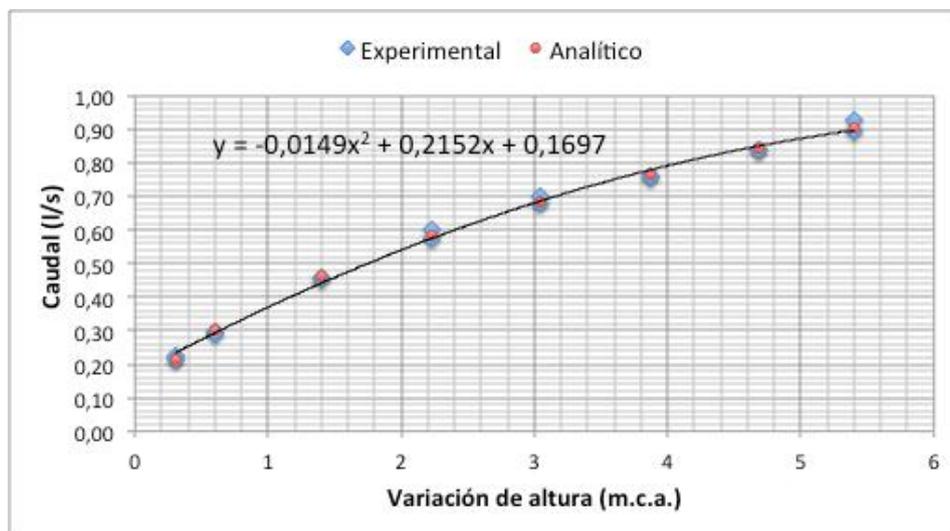


Figura 3.22: Resultados del diafragma representados gráficamente.

Como se puede comprobar, el diafragma es una opción válida como caudalímetro por varias razones como son su gran aproximación, comodidad y rapidez. Es por esto que en lo que sigue se usará como norma para medir el caudal de la instalación.

3.6.2. Caracterización de la bomba

Un dato que nos permite conocer rápidamente las prestaciones de una bomba es su curva característica. Esta información normalmente es suministrada por el fabricante. En nuestro caso, la obtendremos a partir de ensayos experimentales para más tarde compararla con la curva suministrada por el fabricante. En las dos secciones siguientes se explica la teoría necesaria para llegar a la parametrización de la curva y el modo de proceder en la toma de datos.

3.6.2.1. Curva característica de la bomba

Al igual que para el diafragma, suponemos un flujo ideal y planteamos la ecuación de Bernoulli entre la entrada y la salida de la bomba.

$$p_e + \frac{1}{2}\rho U_e^2 + \rho g h_e + \rho g H_b = p_s + \frac{1}{2}\rho U_s^2 + \rho g h_s \quad (3.8)$$

donde H_b es la altura manométrica adicional que la bomba proporciona al fluido.

Los diámetros de la aspiración e impulsión en nuestra bomba son iguales por lo que podemos simplificar la ecuación anterior eliminando los términos de energía cinética ya que al ser el caudal constante, las velocidades coinciden. Despejamos entonces H_b ,

$$H_b = \frac{p_s - p_e}{\rho g} + (h_s - h_e) \quad (3.9)$$

y analizando el orden de magnitud de cada término ($\frac{p_s - p_e}{\rho g} \sim P_a \gg (h_s - h_e) \sim D$) vemos que la diferencia de cotas en este caso es despreciable quedando la altura manométrica como la diferencia de presión entre la entrada y la salida.

$$H_b = \frac{p_s - p_e}{\rho g} \quad (3.10)$$

Es muy frecuente que este valor se exprese gráficamente en función del caudal suministrado para cada altura. La experiencia ha demostrado que puede parametrizarse como,

$$H_b = a + bQ + cQ^2 \quad (3.11)$$

donde a, b y c son coeficientes que se determinan experimentalmente.

3.6.2.2. Modo de operación

Para la toma de datos seguimos los siguientes pasos:

1. En primer lugar, seguimos las indicaciones de la sección 3.4. Estas medidas se llevarán a cabo con el tubo de PVC en la posición normal del Venturi al igual que en el caso anterior (Figura 3.20 en la página 44).
2. Conectamos las tomas de presión de la impulsión y aspiración al manómetro y vacuómetro de tipo Bourdon, respectivamente; las diferencias de presión en la bomba requieren el uso de estos dispositivos por su mayor rango de medida.
3. Guiamos el flujo al depósito inferior (Configuración B).

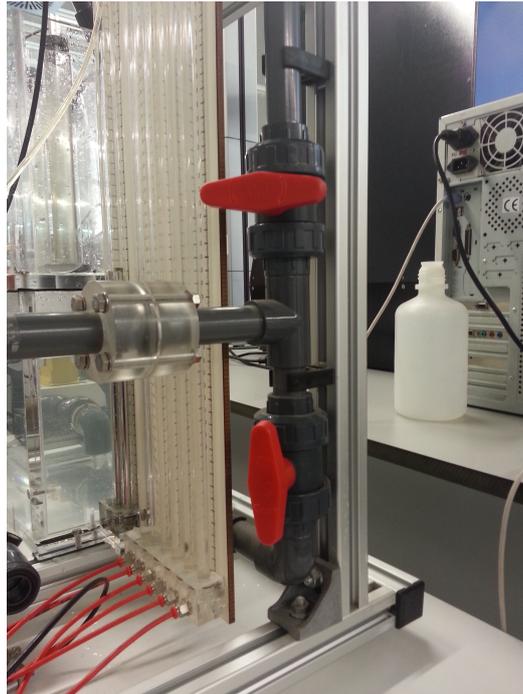


Figura 3.23: Flujo guiado al depósito inferior.

4. Antes de establecer un caudal, tomar nota de la altura manométrica que proporciona la bomba para un caudal nulo. Después comenzamos abrir la válvula de membrana fijando un caudal.
5. Medimos este caudal usando el salto de presión en el diafragma como se ha explicado en la sección anterior.
6. Tomamos las medidas en el manómetro y vacuómetro.
7. Repetimos 4, 5 y 6 hasta llegar a la máxima diferencia de presión que soporta el manómetro de mercurio. Se puede llegar a una apertura total de la válvula desconectando el manómetro de mercurio y midiendo el caudal con el depósito calibrado.

3.6.2.3. Toma de datos y cálculos

Datos experimentales Siguiendo las indicaciones anteriores se han recogido los siguientes datos:

	Manómetros tipo Bourdon		Manómetro de Hg	
	Manómetro(<i>m.c.a.</i>)	Vacuómetro(<i>cm Hg</i>)	H1(<i>mm Hg</i>)	H2(<i>mm Hg</i>)
1	17	1,667	0	0
2	16,5	2,5	220	242
3	16	3,33	200	260
4	16	3,33	180	283
5	15,5	4,17	160	300
6	15,25	5	140	320
7	15	5,25	120	344
8	14,9	6	100	361
9	14,5	6,25	80	379
10	14,4	7	60	400
11	14	7,25	40	420
12	13,75	8	20	440
13	13,5	8,1	0	459

Tabla 3.11: Datos recogidos de la bomba.

Cálculos Usando la ecuación 3.10 se obtiene la altura manométrica, H_b , que proporciona la bomba y con la 3.4, al igual que en la sección anterior, se calcula el caudal aportado. En la siguiente Tabla 3.12 se recogen los resultados.

n ^o experimento	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
H_b (<i>m.c.a.</i>)	16,77	16,16	15,55	15,55	14,93	14,57	14,29	14,08	13,65	13,45	13,01	12,66	12,40
Q (<i>l/min</i>)	0,00	12,81	21,16	27,73	32,32	36,65	40,89	44,14	47,24	50,37	53,26	55,99	58,53

Tabla 3.12: Altura manométrica de la bomba y caudal.

Estos datos representados en un gráfico $H-Q$ dan lugar a la curva característica de la bomba. En la Figura 3.24 aparece en color azul la curva experimental y en color rojo la curva de un catálogo comercial de la marca[1]. Se ha comprobado que el régimen de giro es el mismo en ambas curvas. La diferencia existente entre ambas puede ser consecuencia de un impulsor excesivamente mecanizado ya que si la comparamos con el modelo inferior tampoco se ajustan.

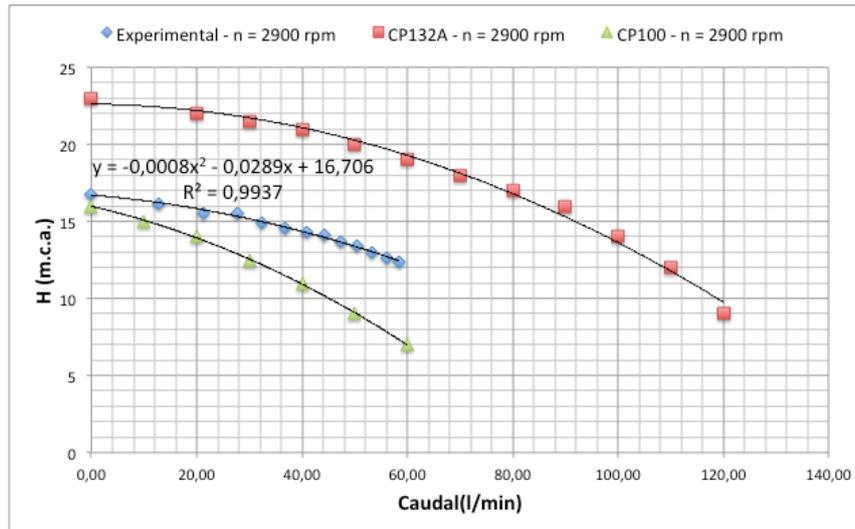


Figura 3.24: Curva característica de la bomba.

El ajuste de los datos experimentales a la función parabólica de la expresión 3.11 nos da la siguiente ecuación,

$$H_b(Q) = 16,706 - 0,0289Q - 0,0008Q^2 \quad (3.12)$$

con la cual se determina la altura manométrica en función del caudal. También puede ser usada de manera inversa, es decir, a partir de la altura manométrica calcular el caudal bombeado.

Capítulo 4

Modelo analítico de la instalación y predicción de la cavitación

En este capítulo se desarrollará un modelo matemático para el cálculo de caudales y presiones en la instalación y se estimará mediante éste las condiciones de contorno teóricas que darían lugar al inicio de la cavitación en nuestro tubo de Venturi. Para ello, aplicaremos la teoría desarrollada en el Capítulo 2 y 3.

4.1. Modelo analítico para el cálculo de la presión

En una instalación hidráulica es interesante que fijado un parámetro del sistema (el caudal, presión de descarga,...) podamos estimar el resto de parámetros en los puntos críticos de la instalación. Para ello, es necesario plantear las ecuaciones que determinan el comportamiento de cada uno de los elementos de la instalación. Los puntos singulares donde se estimará la presión serán aquellos señalados en la sección 3.2 ya que pueden ser comparados con su presión experimental.

Antes de comenzar a formular las ecuaciones para cada componente vamos a resumir en varias tablas qué elementos nos encontramos en cada tramo.

Tramo 0-1		Tramo 1-2	
Tubería 32Ø	Elementos singulares	Tubería 32Ø	Elementos singulares
0,15 m	2 codos 32Ø / 90º	0 m	Bomba
Tramo 2-3		Tramo 3-4	
Tubería 25Ø	Elementos singulares	Tubería 25Ø	Elementos singulares
0,235 m	1 codo 32Ø / 90º	0 m	Zona convergente
	1 codo 25Ø / 90º		
	Válvula membrana		
	Estrechamiento		
Tramo 4-5		Tramo 5-6	
Tubería 25Ø	Elementos singulares	Tubería 25Ø	Elementos singulares
0 m	Zona divergente	0,480 m	Ensanchamiento
			1 codos 25Ø / 90º
Tramo 6-7		Tramo 7-8a	
Tubería 25Ø	Elementos singulares	Tubería 25Ø	Elementos singulares
0 m	Diafragma	0,3m	1 válvula de esfera 25Ø
			2 T de 25Ø (flujo lateral)
Tramo 7-8b			
Tubería 25Ø	Elementos singulares		
0,24 m	1 válvula de esfera 25Ø		
	2 codos 25Ø / 90º		
	1 T de 25Ø (flujo lateral)		

Cuadro 4.1: Elementos en cada uno de los puntos de análisis de la instalación.

Todos los elementos nombrados en las anteriores tablas han sido descritos en la sección 3.3.

Altura geométrica de cada punto(plano de referencia: fondo del depósito):

Punto	Altura(cm)
0	0
1	5,5
2	23
3	23
4	23
5	23
6	23
7	23
8a	0
8b	53

Tabla 4.2: Altura geométrica de los puntos de la instalación.

Para calcular la presión en un punto determinado usamos la expresión de la bibliografía [15] para tuberías de sección redonda añadiendo un término que representa la pérdida de carga en el estrechamiento y el ensanchamiento, los cuales son de sección rectangular.

$$-g\Delta H = Q^2 \left[\sum_i \frac{8\lambda_i L_i}{\pi^2 D_i^5} + \sum_j \frac{8K_j}{\pi^2 D_j^4} + \sum_n \frac{K_n}{2A^2} \right] - gH_m \quad (4.1)$$

Identificamos los términos de esta expresión,

- $g\Delta H$, energía específica en el punto de análisis.
- $Q^2 \frac{8\lambda_i L_i}{\pi^2 D_i^5}$, pérdidas de carga en los tramos de tubería.
- $Q^2 \frac{8K_j}{\pi^2 D_j^4}$, pérdidas de carga en los elementos de sección circular(codos,válvulas,...).
- $Q^2 \frac{K_n}{2A^2}$, pérdidas de carga en los elementos de sección rectangular(ensanchamiento y estrechamiento).
- gH_m , energía específica de la bomba.

A continuación, procedemos a calcular las presiones en m.c.a en cada uno de los puntos que aparecen en las tablas anteriores.¹

$$H_0 = \frac{P_a}{\rho g} + z_0 = 10,3494 + z_0$$

¹Las ecuaciones algebraicas aparecen en el Anexo. La sustitución de valores numéricos ha sido hecha con un programa de cálculo y aparecen también en el Anexo.

$$H_1 = H_0 - \frac{Q^2}{g} \left[\sum_i \frac{8\lambda_i L_i}{\pi^2 D_i^5} + \sum_j \frac{8K_j}{\pi^2 D_j^4} \right] = 359066Q^2 + 10,3494 + z_0$$

$$H_2 = H_1 + H_b = -3,23907 \cdot 10^6 Q^2 - 1734Q + 27,0554 + z_0$$

$$H_3 = H_2 - \frac{Q^2}{g} \left[\sum_i \frac{8\lambda_i L_i}{\pi^2 D_i^5} + \sum_j \frac{8K_j}{\pi^2 D_j^4} + \sum_n \frac{K_n}{2A^2} \right] = (-3,97396 \cdot 10^6 - 409051K_{valvula})Q^2 - 1734Q + 27,0554 + z_0$$

$$H_4 = H_3 - \frac{Q^2}{g} \left[\sum_n \frac{K_n}{2A^2} \right] = (-3,97396 \cdot 10^6 - 409051K_{valvula})Q^2 - 1734Q + 27,0554 + z_0$$

$$H_5 = H_4 - \frac{Q^2}{g} \left[\sum_n \frac{K_n}{2A^2} \right] = (-1,10529 \cdot 10^7 - 409051K_{valvula})Q^2 - 1734Q + 27,0554 + z_0$$

$$H_6 = H_5 - \frac{Q^2}{g} \left[\sum_i \frac{8\lambda_i L_i}{\pi^2 D_i^5} + \sum_j \frac{8K_j}{\pi^2 D_j^4} + \sum_n \frac{K_n}{2A^2} \right] = (-1,1731 \cdot 10^7 - 409051K_{valvula})Q^2 - 1734Q + 27,0554 + z_0$$

$$H_7 = H_6 - \frac{Q^2}{g} \left[\sum_j \frac{8K_j}{\pi^2 D_j^4} \right] = (-1,64515 \cdot 10^7 - 409051K_{valvula})Q^2 - 1734Q + 27,0554 + z_0$$

$$H_{8a} = H_7 - \frac{Q^2}{g} \left[\sum_i \frac{8\lambda_i L_i}{\pi^2 D_i^5} + \sum_j \frac{8K_j}{\pi^2 D_j^4} \right] = (-1,80697 \cdot 10^7 - 409051K_{valvula})Q^2 - 1734Q + 27,0554 + z_0$$

$$H_{8b} = H_7 - \frac{Q^2}{g} \left[\sum_i \frac{8\lambda_i L_i}{\pi^2 D_i^5} + \sum_j \frac{8K_j}{\pi^2 D_j^4} \right] = (-1,80095 \cdot 10^7 - 409051K_{valvula})Q^2 - 1734Q + 27,0554 + z_0$$

Ecuaciones de cierre del modelo analítico(condición de contorno):

Ecuación de cierre 1: $(H_{8a})_{c.c} = \frac{P_a}{\rho g} + \frac{1}{2g} \left(\frac{4Q}{\pi D_{8a}^2} \right)^2 + z_{8a} = 10,8794 + 409051Q^2$

Ecuación de cierre 2: $(H_{8b})_{c.c} = \frac{P_a}{\rho g} + \frac{1}{2g} \left(\frac{4Q}{\pi D_{8b}^2} \right)^2 + z_0 = 10,3494 + 409051Q^2 + z_0$

La presión en cada punto queda como función de la altura de agua en el depósito, z_0 , del caudal, Q , y de la constante de pérdidas de la válvula, $K_{válvula}$. El modo de funcionamiento de este modelo analítico es el siguiente:

1. Establecemos la altura de agua en el depósito, z_0 .
2. Regulamos la apertura de la válvula de membrana. Con este grado de apertura, en tanto por cien, usamos los valores tabulados obtenidos en el Anexo (Tabla B.2 en la página 97), la cual nos proporciona el valor de la constante de pérdidas, $K_{válvula}$.
3. Usando una de las ecuaciones de cierre que incluye el modelo, obtenemos el caudal analítico. ($H_{8a} = (H_{8a})_{c.c}$ ó $H_{8b} = (H_{8b})_{c.c}$)
4. Una vez obtenido el caudal analítico, calculamos la presión en todos los puntos significativos de la instalación.

Podemos comprobar que aunque hemos denominado a este sistema de ecuaciones con el nombre de modelo analítico para el cálculo de la presión, también es capaz de estimar caudales. En la siguiente sección comprobaremos el ajuste del modelo a la experimentación mediante la comparación del caudal analítico y el medido.

Volviendo a las expresiones anteriores, éstas nos proporcionan la presión en metros de columna de agua y para expresar la presión estática en Pascales es suficiente con despejar P_0 de esta igualdad,

$$H = \frac{P_0}{\rho g} + \frac{U^2}{2g} + z$$

donde $U = Q/A$.

4.2. Cálculo del caudal analítico

A continuación, vamos a calcular el caudal circulante por la instalación para los siguientes grados de apertura de la válvula: 2 %, 4 %, 7 %, 10 %, 15 %, 20 % y 25 %. A la vez que vayamos obteniendo los caudales analíticos, los compararemos con el caudal medido para esa misma apertura de la válvula, y así, comprobaremos si el modelo es válido o no.

En los siguientes cálculos se ha usado la tabla del Anexo (Tabla B.2 en la página 97) para conocer la pérdida de carga de la válvula, la cual ha sido sustituida en la expresión H_{sb} que se ha reescrito para que aparezca la presión ambiente y así se vea claramente que el caudal es independiente de la presión ambiente y de la altura de agua en el depósito pues al igualar H_{sb} a la presión en la salida de la tubería (ecuación de cierre 2, $(H_{sb})_{c.c}$) estos términos se anulan, es decir,

$$\underbrace{\frac{P_a}{\rho g} + z_0 + (-1,80095 \cdot 10^7 - 409051 K_{valvula}) Q^2 - 1734 Q + 16,706}_{H_{sb}} = \underbrace{\frac{P_a}{\rho g} + z_0 + \frac{1}{2g} \left(\frac{4Q}{\pi D_{8b}^2} \right)^2}_{(H_{sb})_{c.c}}$$

Se ha comprobado que se obtienen caudales similares operando con $H_{8a} = (H_{8a})_{c.c}$.

Nivel de apertura de la válvula de membrana: 2 %

$$Kv(2\%) = 262$$

	$Q(m^3/s)$	$Q(l/min)$	$error(\%)$
ANALÍTICO	3,58E-4	21,48	0,7 %
EXPERIMENTAL	3,55E-4	21,33	

Nivel de apertura de la válvula de membrana: 4 %.

$$Kv(4\%) = 135$$

	$Q(m^3/s)$	$Q(l/min)$	$error(\%)$
ANALÍTICO	4,65E-4	27,9	0,14 %
EXPERIMENTAL	4,66E-4	27,94	

Nivel de apertura de la válvula de membrana: 7 %.

$$Kv(7\%) = 87$$

	$Q(m^3/s)$	$Q(l/min)$	<i>error(%)</i>
ANALÍTICO	5,40E-4	32,4	0,55 %
EXPERIMENTAL	5,43E-4	32,58	

Nivel de apertura de la válvula de membrana: 10 %.

$$Kv(10\%) = 58$$

	$Q(m^3/s)$	$Q(l/min)$	<i>error(%)</i>
ANALÍTICO	6,09E-4	36,54	1,08 %
EXPERIMENTAL	6,16E-4	36,94	

Nivel de apertura de la válvula de membrana: 15 %.

$$Kv(15\%) = 33,5$$

	$Q(m^3/s)$	$Q(l/min)$	<i>error(%)</i>
ANALÍTICO	6,95E-4	41,7	1,16 %
EXPERIMENTAL	6,87E-4	41,21	

Nivel de apertura de la válvula de membrana: 20 %.

$$Kv(20\%) = 13$$

	$Q(m^3/s)$	$Q(l/min)$	<i>error(%)</i>
ANALÍTICO	8,03E-4	48,18	8,34 %
EXPERIMENTAL	7,41E-4	44,48	

Nivel de apertura de la válvula de membrana: 25 %.

$$Kv(25\%) = 6$$

	$Q(m^3/s)$	$Q(l/min)$	$error(\%)$
ANALÍTICO	8,54E-4	51,24	11,22 %
EXPERIMENTAL	7,68E-4	46,07	

Estos datos permiten establecer una relación entre la $K_{válvula}$ y el caudal, Q , que representamos gráficamente,

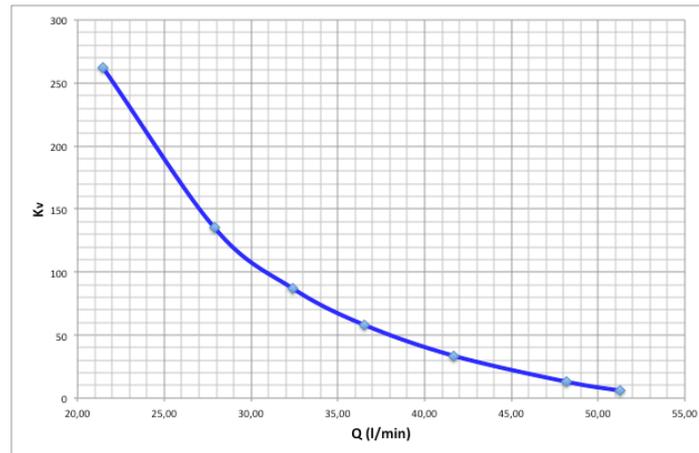


Figura 4.1: Gráfica $K_{válvula}$ frente al caudal

Podemos concluir que el modelo es válido para calcular el caudal con un error menor al 1,2 % siempre que la cavitación no esté plenamente desarrollada (de la experimentación sabemos que se manifiesta a partir de un 10 % y está desarrollada para valores superiores al 20 %). Además, como el objetivo principal del modelo es predecir el inicio de la cavitación, el cual como veremos más adelante se produce entre un 10 % y un 15 % de apertura de la válvula, valores para los cuales el error cometido por el modelo es bastante pequeño. Este mínimo error para estos niveles de apertura, nos permitirá calcular con precisión las condiciones de inicio de este fenómeno. El aumento del error en los últimos casos es debido al bloqueo del flujo a causa de la aparición de la cavitación en la garganta y que el modelo analítico no contempla en sus ecuaciones, es decir, el caudal experimental comienza a estabilizarse acercándose a su máximo mientras que el analítico aumenta sin ninguna restricción.

4.3. Cálculo de la presión estática

Como se dijo en el Capítulo 2, la cavitación viene dada por un descenso de la presión por debajo de la presión crítica o de vapor del fluido, en este caso agua. Por tanto, para saber si se produce esa situación en la garganta del Venturi es

necesario conocer la presión estática del fluido en este punto de la instalación (Punto 4). La ecuación que nos permitirá conocer la presión estática en este punto ha sido desarrollada en la sección 4.1.

Para las configuraciones de apertura de la válvula más usadas durante la caracterización de la instalación y para una configuración de funcionamiento del tipo B se va a proceder a calcular la presión estática en los puntos característicos de la instalación. Supondremos una situación donde el depósito tiene una altura media de agua, $z_0 = 24,5 \text{ cm}$.

Grado de apertura	2%	4%	7%	10%	15%	20%	25%
$K_{válvula}$	262	135	87	58	33,5	13	6
$Q(l/min)$	21,48	27,9	32,4	36,54	41,7	48,18	51,24
P_0	103.724	103.724	103.724	103.724	103.724	103.724	103.724
P_1	102.545	102.105	101.729	101.333	100.773	99.965	99.543
P_2	254.699	249.959	246.185	242.382	237.200	229.997	226.326
P_3	116.648	127.027	136.453	145.889	158.923	178.440	188.458
P_4	70.143	48.569	30.645	11.314	-16.344	-55.531	-76.177
P_5	107.765	112.042	116.243	120.185	125.447	133.751	137.912
P_6	109.243	114.536	119.607	124.463	131.018	141.188	146.324
P_7	103.320	104.543	106.130	107.323	108.695	111.389	112.619
P_{8b}	103.617	103.497	103.934	103.918	103.580	103.805	103.746

Cuadro 4.3: Presión estática en los puntos significativos de la instalación.

Observamos que para el caudal de 41,7 l/min la presión es negativa, lo cual es físicamente imposible, ya que implicaría una carga de tracción y los fluidos no son capaces de soportar este tipo de fuerzas. En realidad, esto nos indica que para ese caudal ya ha aparecido la cavitación en la garganta del Venturi y la presión en ésta es la presión de vapor. Este hecho notable se debe a que el modelo matemático, como ya hemos dicho anteriormente, no tiene ninguna restricción que le impida llegar a presiones por debajo de la crítica. Por tanto, a partir de este caudal el modelo analítico deja de ser válido.

En el siguiente capítulo, cuando exponamos los datos experimentales, se hará una comparación de estos resultados analíticos con los medidos experimentalmente.

4.4. Cálculo del inicio de la cavitación

En la sección anterior hemos visto como el modelo predice el inicio de la cavitación entre dos posiciones de la válvula (10% y 15%) pero no se conoce el nivel de apertura exacto, ni por tanto, tampoco el caudal. Para determinar el nivel de apertura teórico que consigue el inicio de este fenómeno es necesario un proceso iterativo con las ecuaciones del modelo. A continuación se describe el procedimiento:

1. Establecemos un grado de apertura de la válvula. Con lo visto en la sección anterior sería idóneo comenzar a partir de un 10 % de apertura; con la tabla que aparece en el Anexo obtenemos la $K_{válvula}$ (Tabla B.2 en la página 97).
2. Con la condición de contorno de presión en 8a o 8b obtenemos el caudal analítico, Q . En estos cálculos usaremos H_{8b} . En la sección 4.2 en la página 58 se ha visto que si la ecuación de cierre es H_{8b} , la altura de agua en el depósito y la presión ambiente no influyen puesto que se anulan; pero en las ecuaciones del modelo matemático se han sustituido los valores numéricos de P_a y z_0 , por lo que también debemos incluir estos valores en la condición de contorno al final de la tubería (punto 8b) aunque como sabemos se van a anular.
3. Obtenemos el valor de H_4 y mediante la expresión $H = \frac{P_0}{\rho g} + \frac{U^2}{2g} + z$ obtenemos la presión estática, P_0 , en la garganta del Venturi.
4. Si $P_0 \simeq P_v$ entonces ya tenemos el nivel de apertura teórico para el cual comienza la cavitación y también el caudal circulante. Si no se cumple lo anterior entonces reajustamos la apertura de la válvula y repetimos el proceso hasta que la presión estática sea próxima a la de vapor para la temperatura de funcionamiento ($T_{func}^a = 25^\circ\text{C}$).

Para estos cálculos, supondremos también una $z_0 = 24,5 \text{ cm}$.

1º Iteración

Apertura de la válvula: 11 % (Tabla B.2 en la página 97)

$$Kv(11\%) = 52$$

Ecuación del modelo analítico al final de la tubería (punto 8b):

$$H_{8b}(Q) = 27,3004 - 1734Q - 3,92801 \cdot 10^7 Q^2$$

Condición de contorno al final de la tubería (punto 8b):

$$H_{8b}(Q) = \frac{P_a}{\rho g} + \frac{1}{2g} \left(\frac{4Q}{\pi \cdot 0,0212^2} \right)^2 + z_0 = 10,5944 + 409051,31Q^2$$

Igualamos ambas expresiones y despejamos el caudal, Q :

$$Q = 0,000627 \text{ m}^3/\text{s} = 37,62 \text{ l/min}$$

Despejamos P_4 usando el resultado de la expresión $H_4(Q, K_{v\grave{a}lvula})$ del modelo analítico e igualándolo a $H = \frac{P_{0,4}}{\rho g} + \frac{U_4^2}{2g} + z_4$:

$$H_4(Q) = 16,2888 = \frac{P_4}{\rho g} + \frac{1}{2g} \left(\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot 0,0212^2} \right)^2 + z_4$$

$$P_4 = 5855 \text{ Pa}$$

Para una apertura del 11 % comprobamos que la presión estática en la garganta del Venturi es bastante próxima a la de vapor para esta temperatura de funcionamiento, 25°C. Vamos a realizar una iteración más para conseguir afinar la apertura y el caudal que consiguen la presión de vapor en el Venturi.

2º Iteración

Apertura de la válvula: 12 % (Tabla B.2 en la página 97)

$$Kv(12\%) = 47$$

Ecuación del modelo analítico al final de la tubería (punto 8b):

$$H_{8b}(Q) = 27,3004 - 1734Q - 3,72349 \cdot 10^7 Q^2$$

Condición de contorno al final de la tubería (punto 8b):

$$H_{8b}(Q) = \frac{P_a}{\rho g} + \frac{1}{2g} \left(\frac{4Q}{\pi \cdot 0,0212^2} \right)^2 + z_0 = 10,5944 + 409051,31Q^2$$

Igualamos las dos últimas expresiones y despejamos el caudal, Q :

$$Q = 0,000643 \text{ m}^3/\text{s} = 38,58 \text{ l/min}$$

Despejamos P_4 usando el resultado de la expresión $H_4(Q, K_{v\grave{a}lvula})$ del modelo analítico e igualándolo a $H = \frac{P_{0,4}}{\rho g} + \frac{U_4^2}{2g} + z_4$:

$$16,5937 = \frac{P_4}{\rho g} + \frac{1}{2g} \left(\frac{4 \cdot 0,000653}{\pi \cdot 0,0212^2} \right)^2 + z_4$$

$$P_4 = 1016 \text{ Pa}$$

3º Iteración

Apertura de la válvula: 11,5 % (Tabla B.2 en la página 97)

$$Kv(11,5\%) = 50$$

Ecuación del modelo analítico al final de la tubería (punto 8b):

$$H_{8b}(Q) = 27,3004 - 1734Q - 3,8462 \cdot 10^7 Q^2$$

Condición de contorno al final de la tubería (punto 8b):

$$H_{8b}(Q) = \frac{P_a}{\rho g} + \frac{1}{2g} \left(\frac{4Q}{\pi \cdot 0,0212^2} \right)^2 + z_0 = 10,5944 + 409051,31Q^2$$

Igualemos las dos últimas expresiones y despejamos el caudal, Q :

$$Q = 0,000634 \text{ m}^3/\text{s} = 38,04 \text{ l/min}$$

Despejamos P_4 usando el resultado de la expresión $H_4(Q, K_{válvula})$ del modelo analítico e igualándolo a $H = \frac{P_{0,4}}{\rho g} + \frac{U_4^2}{2g} + z_4$:

$$16,5937 = \frac{P_4}{\rho g} + \frac{1}{2g} \left(\frac{4 \cdot 0,000653}{\pi \cdot 0,0212^2} \right)^2 + z_4$$

$$P_4 = 3376 \text{ Pa}$$

Para esta iteración la presión en la garganta es bastante próxima a la de vapor ($P_v(25^\circ\text{C}) = 3169 \text{ Pa}$). Por tanto, concluimos que la cavitación comienza, según el modelo analítico, para los siguientes valores:

Apertura de la válvula: 11,5 % $\rightarrow Kv(11,5\%) = 50$

Caudal: $Q = 38,04 \text{ l/min}$

Presión en la garganta del Venturi: $P_4 = 3376 \text{ Pa}$

Condiciones de contorno:

Presión atmosférica: $P_a = 101325 \text{ Pa}$

Presión de descarga: atmosférica, P_a

Temperatura del agua: $T_{func} = 25^\circ\text{C}$

Presión de vapor a 25°C : $P_v = 3169 \text{ Pa}$

4.5. Cálculo del número adimensional σ

El número adimensional de la cavitación, σ , es un dato mucho más rápido de obtener. Este parámetro puede servir como primera aproximación en el diseño de cualquier elemento hidráulico pero por ser la cavitación un fenómeno complejo es inevitable que el error sea grande en algunas ocasiones. Es mucho más útil en flujos externos donde la presión aguas arriba se mantiene constante. En nuestro caso, al tratarse de un flujo interno, donde la presión aguas arriba varía según las condiciones de funcionamiento, no es tan práctico.

En la siguiente tabla aparece el coeficiente σ para presiones dentro del rango de funcionamiento de la instalación. Comparándolo con el parámetro crítico, $\sigma_{crítico} = -C_{p,min} = -(C_p)_g$, podremos estimar si existe o no cavitación en la garganta del Venturi.

$$\sigma = \frac{P_3 - P_v}{\frac{1}{2}\rho U_3^2}$$

Grado de apertura	P_3	$Q(l/min)$	$U_3(m/s)$	σ
2 %	116.648	21,48	2,39	39,92
4 %	127.027	27,9	3,10	25,83
7 %	136.453	32,4	3,60	20,61
10 %	145.889	36,54	4,06	17,35
15 %	158.923	41,7	4,63	14,54
20 %	178.440	48,18	5,35	12,26
25 %	188.458	51,24	5,69	11,46

Cuadro 4.4: Coeficientes de cavitación para distintas presiones de trabajo.

Recuperando la expresión 2.23, $(C_p)_g = 1 - \left(\frac{A_\infty}{A_g}\right)^2 = 1 - \left(\frac{0,025 \cdot 0,006}{0,006^2}\right)^2 = -16,36$. Por tanto, como la condición de cavitación es $\sigma < -(C_p)_g$, con los resultados del modelo analítico para la presión en el punto 3 y el caudal, Q , la cavitación aparece también para un caudal comprendido entre 36,54 y 41,7 l/min y una apertura del 10 % al 15 %, como ocurría en la sección anterior donde calculamos la presión estática en la garganta del Venturi.

Capítulo 5

Estudio experimental de la cavitación

A lo largo de este capítulo se expondrán los datos experimentales recogidos durante ensayos realizados en la instalación del laboratorio y, también, se compararán estos resultados con los del capítulo anterior.

5.1. Modo de operación

Para la toma de datos seguimos los siguientes pasos:

1. En primer lugar, seguimos las indicaciones de la sección 3.4 en la página 38, Puesta en marcha de la instalación. Estas medidas se llevarán a cabo con el Venturi de sección rectangular.
2. Colocamos las válvulas para la configuración B. Llenamos el depósito a la altura determinada en cada ensayo: mínima, media o máxima.
3. Usando la válvula de membrana fijamos un caudal.
4. Tomamos las medidas en los manómetros correspondientes: las alturas en el manómetro de mercurio nos servirán para conocer el caudal circulante y con el manómetro Bourdon y el vacuómetro tendremos las presiones en los puntos más significativos del Venturi. Las medidas aguas arriba(3) y aguas abajo(5) se toman con el único manómetro Bourdon del que dispone la instalación, por tanto, será necesario intercambiar su posición para cada medida. Se tomará nota de la condición de presión y caudal para la cual la cavitación se manifiesta.
5. Repetimos 3 y 4 hasta llegar a una apertura total de la válvula.

5.2. Datos experimentales

Las condiciones atmosféricas en el laboratorio durante los ensayos fueron las siguientes:

- Presión atmosférica local: $1013 \text{ mbar} \simeq 101325 \text{ Pa}$
- Temperatura del agua: $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ————— $P_{\text{vapor}}(25^\circ\text{C}) = 3169 \text{ Pa}$

Las medidas de presión que nos proporcionan el manómetro y vacuómetro son presiones estáticas y relativas a la presión atmosférica (ver Figura 5.1), por tanto, para obtener la presión absoluta se debe sumar primeramente la presión dinámica y altura de la columna de agua obteniendo así la presión total y para obtener la absoluta añadimos la presión atmosférica. En nuestro caso, como lo que nos interesa es conocer la presión estática absoluta solamente debemos sumar la presión atmosférica.

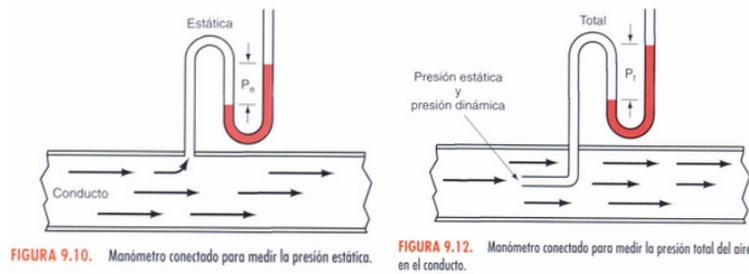


Figura 5.1: Diferencia en la medida de presión estática y total.

5.2.1. Ensayo I: columna de agua mínima.

Altura de agua en el depósito: $z_0 = 0,06 \text{ m}$

CAUDAL					VENTURI			CAVITACIÓN
Apertura vál.	H1	H2	Q(l/min)	Q(m ³ /s)	P ₃ (mca)	P ₄ (cmHg)	P ₅ (mca)	SI / NO
2 %	200	260	21,33	3,55E-04	1,75	- 23	1	NO
4 %	180	283	27,94	4,66E-04	2,75	- 36	1,5	NO
7 %	160	300	32,58	5,43E-04	3,5	- 52	2	NO
10 %	140	320	36,94	6,16E-04	4,5	- 67	2,5	NO(ruido)
15 %	120	344	41,21	6,87E-04	7	- 73	3	SÍ
20 %	100	361	44,48	7,41E-04	10	- 73	3,1	SI
25 %	90	370	46,07	7,68E-04	11,5	- 73	3,5	SI
100 %	90	370	46,07	7,68E-04	11,5	- 73	3,5	SI

Cuadro 5.1: Datos ensayo I.

5.2.2. Ensayo II: columna de agua media.

Altura de agua en el depósito: $z_0 = 0,245 \text{ m}$

CAUDAL					VENTURI			CAVITACIÓN
Apertura vál.	H1	H2	Q(l/min)	Q(m ³ /s)	P ₃ (mca)	P ₄ (cmHg)	P ₅ (mca)	SI / NO
2 %	200	260	21,33	3,55E-04	2	- 19	1	NO
4 %	180	283	27,94	4,66E-04	3	- 36	1,5	NO
7 %	160	300	32,58	5,43E-04	4	- 50,5	2	NO
10 %	140	320	36,94	6,16E-04	5	- 65,5	2,5	NO(ruido)
15 %	120	344	41,21	6,87E-04	7	- 73	3	SÍ
20 %	100	361	44,48	7,41E-04	10	- 73	3,1	SI
25 %	90	370	46,07	7,68E-04	11,5	- 73	3,5	SI
100 %	90	370	46,07	7,68E-04	11,5	- 73	3,5	SI

Cuadro 5.2: Datos ensayo II.

5.2.3. Ensayo III: columna de agua máxima.

Este ensayo no se llegó a realizar debido a las fugas que presentaba el depósito. Además, como puede observarse en las medidas anteriores, el aumento de varios centímetros en la columna de agua no es significativo.

5.3. Resultados

A continuación, para cada ensayo vamos a calcular la presión estática absoluta expresada en Pascales en los tres puntos del Venturi.

$$\text{De m.c.a. a Pascales: } P_{abs} = P_a + \rho_{agua}gH[m.c.a]$$

$$\text{siendo } \rho_{agua} = 998 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{De cmHg a Pascales: } P_{abs} = P_a + \rho_{Hg}g\frac{H[cmHg]}{100}$$

$$\text{siendo } \rho_{Hg} = 13595,1 \text{ kg/m}^3$$

Una vez hecho esto, podemos comparar la presión en la garganta con la presión de vapor. Las situaciones donde la presión sea menor que la de vapor presentarán, teóricamente, el fenómeno de la cavitación.

5.3.1. Resultados Ensayo I

VENTURI					
Apertura vál.	Q(l/min)	$P_3(Pa)$	$P_4(Pa)$	$P_5(Pa)$	Cavitación
2 %	21,33	118.458	70.661	111.115	NO
4 %	27,94	128.248	53.329	116.010	NO
7 %	32,58	135.591	31.997	120.905	NO
10 %	36,94	145.382	11.999	125.801	NO(ruido)
15 %	41,21	169.858	3.999	130.696	SÍ
20 %	44,48	199.229	3.999	131.675	SI
25 %	46,07	213.914	3.999	135.591	SI
100 %	46,07	213.914	3.999	135.591	SI

Cuadro 5.3: Presiones absolutas en el Venturi(Ensayo I).

Se observa que en los cuatro últimos ensayos en los cuales se manifiesta la cavitación, la presión en la garganta del Venturi es muy próxima a la presión de vapor a $25^{\circ}C$, $P_{vapor}(25^{\circ}C) = 3169 Pa$, y además, se mantiene constante aunque aumentemos la presión aguas arriba. También observamos como el caudal va tendiendo a un máximo hasta que queda bloqueado y la apertura de la válvula no consigue alterar el caudal ni la relación de presiones en el Venturi.

Cuando el nivel de apertura de la válvula es de un 10 % y el caudal de $36,94 l/min$ la nube gaseosa de vapor no está desarrollada pero comienza a oírse levemente el ruido característico de la cavitación. A partir ya de $41,21 l/min$ la nube de vapor comienza a desarrollarse y consigo el ruido se vuelve más fuerte y pueden apreciarse unas pequeñas vibraciones en la tubería del Venturi. Es a partir de un 25 % de apertura de la válvula cuando la nube de vapor alcanza su longitud máxima.

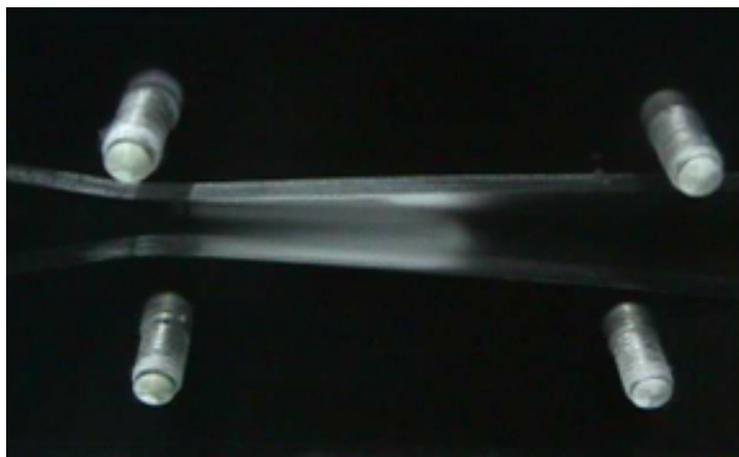


Figura 5.2: Garganta del Venturi con cavitación.[7]

En la siguiente tabla aparecen las longitudes de la nube de vapor para cada nivel de apertura de la válvula. Se puede apreciar un comportamiento lineal en el crecimiento de la estela con respecto a la apertura de la válvula.

<i>Apertura vál.</i>	<i>Longitud(cm)</i>
2 %	-
4 %	-
7 %	-
10 %	-
15 %	2
20 %	4
25 %	5
100 %	5

Cuadro 5.4: Longitud de la nube de vapor.

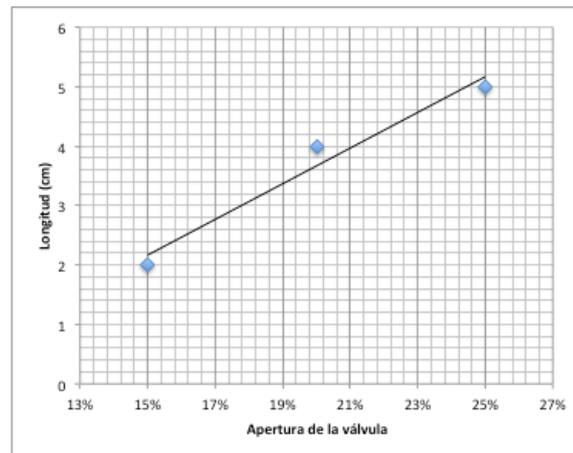


Figura 5.3: Longitud de la nube de vapor frente a la apertura.

Al regular la apertura entre un 10 % y un 15 %, la nube de vapor se vuelve inestable, apareciendo en las paredes del Venturi y desprendiéndose a cortos intervalos de tiempo. En la bibliografía adjunta [3] se trata este comportamiento oscilatorio de la nube de vapor con más detalle, valiéndose para ello del número adimensional de Strouhal y de software CFD.

El rango de apertura anterior, 10 %-15 %, para el cual comienza a desarrollarse la nube de vapor, concuerda con lo obtenido a partir del modelo analítico desarrollado en el capítulo anterior, el cual si recordamos, estimaba una apertura de la válvula de un 11,5 % para el inicio de la cavitación. Por tanto, además de la capacidad del

modelo para predecir caudales, la cual fue comprobada en la sección 4.2, también es válido para estimar el inicio de la cavitación.

Volviendo a la tabla de resultados (Tabla 5.3 en la página 70), si representamos la relación de presiones, P_5/P_3 , (Figura 5.4) se observa como el caudal tiene un comportamiento lineal en el rango 0,85 - 1. Por otro lado, para relaciones inferiores a 0,8 el caudal se mantiene constante. Las limitaciones de la bomba nos impiden alcanzar relaciones de presión por debajo de los 0,6 pero se puede ver que la tendencia para relaciones inferiores es la de mantener constante el caudal.

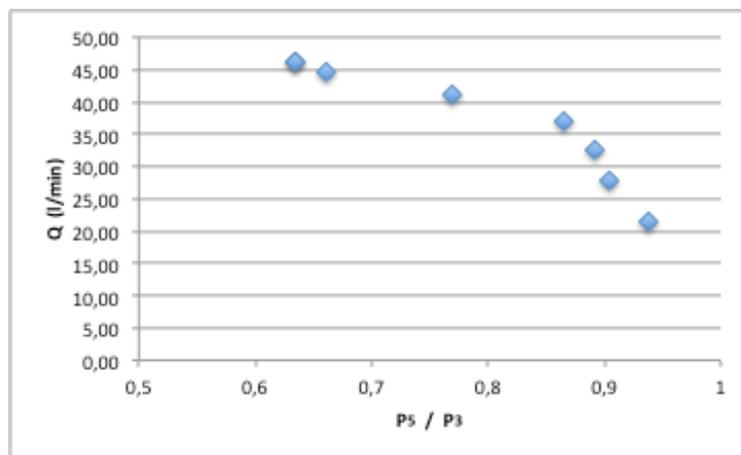


Figura 5.4: Relación de presiones frente a caudal en el Venturi (I).

Esta gráfica concuerda con artículos de investigación que aparecen en la bibliografía[8][2].

Aunque estos artículos de investigación representan una relación de presiones más típica de flujos gaseosos, es recomendable para flujos líquidos usar la diferencia de presiones adimensionalizada, por ejemplo, con la presión aguas arriba. Haciendo esto observamos la misma tendencia pero con rangos distintos. Ahora el caudal es linealmente creciente entre 0-0,15 y se bloquea para valores entre 0,15 y 1.

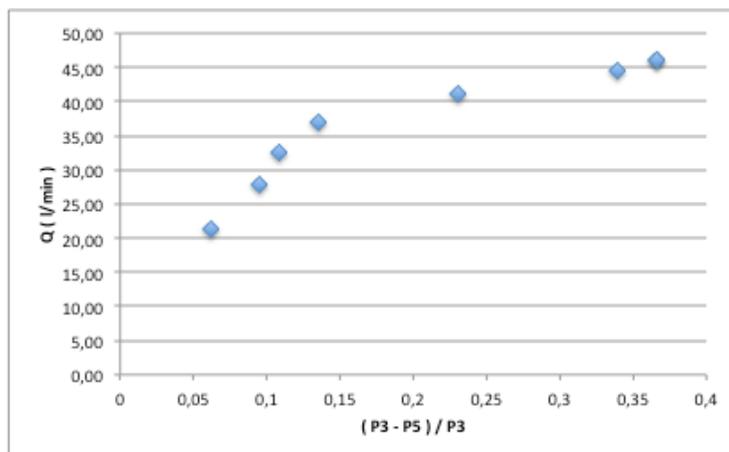


Figura 5.5: Relación de presiones frente a caudal en el Venturi (II).

5.3.2. Resultados Ensayo II.

VENTURI					
Apertura vál.	$Q(l/min)$	$P_3(Pa)$	$P_4(Pa)$	$P_5(Pa)$	Cavitación
2 %	21,33	120.906	75.994	111.115	NO
4 %	27,94	130.696	53.329	116.010	NO
7 %	32,58	140.486	33.997	120.906	NO
10 %	36,94	150.277	13.999	125.801	NO(ruido)
15 %	41,21	169.858	3.999	130.696	SÍ
20 %	44,48	199.229	3.999	131.675	SI
25 %	46,07	213.914	3.999	135.591	SI
100 %	46,07	213.914	3.999	135.591	SI

Cuadro 5.5: Presiones absolutas en el Venturi(Ensayo II).

Como ocurre en el Ensayo I, la presión en la garganta para las situaciones donde aparece la cavitación es próxima a la presión de vapor, además, el caudal también ha quedado bloqueado y la apertura progresiva de la válvula no consigue alterarlo.

Representamos, al igual que en el Ensayo I, las relaciones de presiones frente al caudal observando el mismo comportamiento.

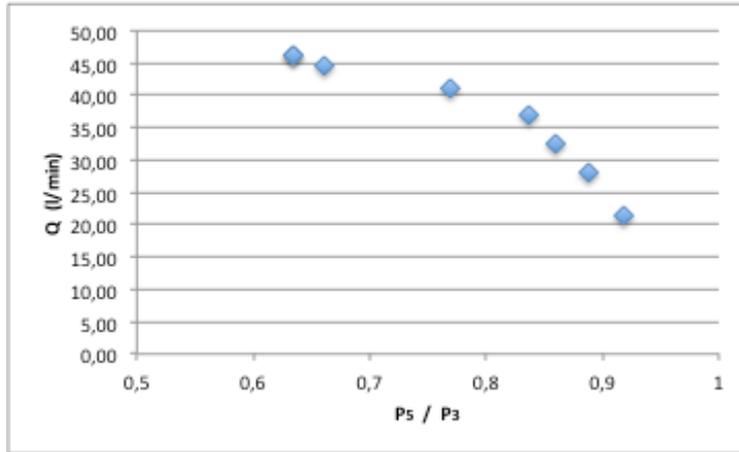
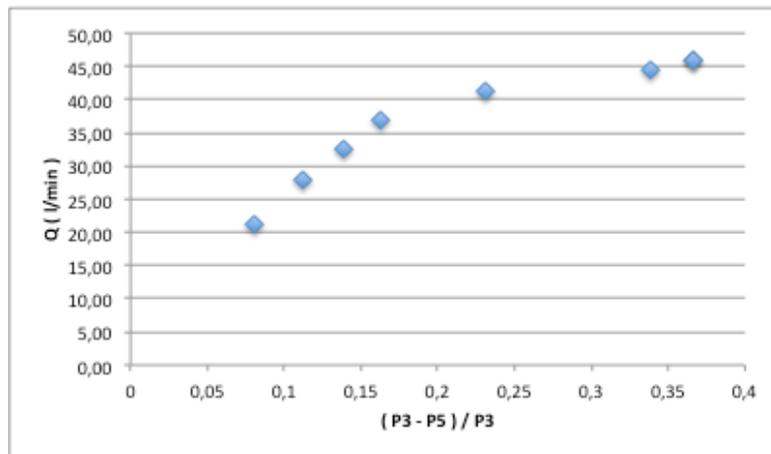


Figura 5.6: Relación de presiones frente a caudal en el Venturi (I).



Cuadro 5.6: Relación de presiones frente a caudal en el Venturi (II).

Todas las conclusiones obtenidas a partir de los resultados y gráficas del Ensayo I son válidas también en este segundo caso.

5.4. Relación de bloqueo y constante de pérdidas en el Venturi

En la subsección 2.7.2.1 en la página 19 desarrollamos una expresión que determinaba la relación de presiones crítica para el inicio de la cavitación. La ecuación era función de las secciones de entrada, A_e , y salida del Venturi, A_s , y de la constante de pérdidas de carga del Venturi, K_p , como se puede apreciar,

$$\left(\frac{P_s}{P_e}\right)_{g.b} = 1 + \frac{K_p}{\left[1 - \left(\frac{A_e}{A_g}\right)^2\right]} \quad (5.1)$$

De esta expresión nos faltaría conocer la constante de pérdidas del Venturi para poder hallar el valor de $\left(\frac{P_s}{P_e}\right)_{g.b}$. Para ello, usaremos los datos experimentales recogidos en los apartados anteriores. Como ya hemos visto, una constante de pérdidas se calcula como la variación de presión entre dos puntos dividida entre la presión dinámica,

$$K_p = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (5.2)$$

Como las secciones de entrada y salida de este Venturi son iguales la expresión quedaría como,

$$K_p = \frac{P_3 - P_5}{\frac{1}{2}\rho \left(\frac{Q}{A_e}\right)^2} \quad (5.3)$$

En la siguiente tabla se muestran los valores de K_p para las configuraciones sin cavitación y su valor medio. Las configuraciones con cavitación se omiten puesto que introducen pérdidas que no son debidas al Venturi sino a la nube de vapor que aparece.

Apertura	$\Delta P(Pa)$	$U(m/s)$	K_p
2 %	7343	2,37	2,62
4 %	12238	3,10	2,54
7 %	14686	3,62	2,25
10 %	19581	4,10	2,33
		$\overline{K_p}$	2,44

Cuadro 5.7: Constante de pérdidas del Venturi

Por tanto, sustituyendo en la ecuación 5.1 tenemos que,

$$\left(\frac{P_s}{P_e}\right)_{g.b} = 1 + \frac{2,44}{\left[1 - \left(\frac{0,025-0,006}{0,006^2}\right)^2\right]} = 0,85$$

Este resultado coincide con lo obtenido gráficamente en las Figuras 5.4 y 5.6 de la sección anterior.

5.5. Comparación de las presiones analíticas y experimentales

En primer lugar recogemos en las siguientes tablas la altura manométrica absoluta, en m.c.a, que proporciona el modelo analítico de distribución de presiones desarrollado en el capítulo anterior y, por otra parte, las presiones manométricas experimentales expuestas en este mismo capítulo. A estas últimas se les ha sumado el término de presión dinámica y la altura geométrica, además de la presión atmosférica, puesto que las medidas experimentales eran presiones estáticas relativas a la atmósfera, es decir, hemos aplicado la siguiente expresión, $H_i = \frac{P_a + P_{estática,i}}{\rho g} + \frac{1}{2g} \left(\frac{Q}{A_i} \right)^2 + z_i$. Es importante no olvidar esto puesto que si no, estaríamos comparando las presiones absolutas proporcionadas por el modelo frente a relativas. En ambos casos la altura de agua en el depósito es de $z_0 = 24,5 \text{ cm}$

TEÓ.		H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7	H_{8a}	H_{8b}
Apertura	2 %	10,55	26,26	12,43	12,43	11,53	11,44	10,84	10,63	10,64
	4 %	10,52	25,79	13,69	13,69	12,16	12,02	11,00	10,65	10,66
	7 %	10,49	25,42	14,83	14,83	12,76	12,57	11,19	10,72	10,74
	10 %	10,46	25,04	15,97	15,97	13,35	13,09	11,34	10,74	10,77
	15 %	10,42	24,53	17,56	17,56	14,14	13,81	11,53	10,75	10,78
	20 %	10,36	23,82	19,92	19,92	15,35	14,91	11,87	10,83	10,87
	25 %	10,33	23,46	21,13	21,13	15,97	15,47	12,03	10,85	10,90

EXP.		H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7	H_{8a}	H_{8b}
Apertura	2 %	9,97	26,82	13,11	12,96	11,73	11,48	10,66	10,35	10,59
	4 %	9,98	26,82	14,32	14,21	12,26	12,16	10,76	10,35	10,59
	7 %	9,88	26,32	15,49	15,30	12,79	12,79	10,89	10,35	10,59
	10 %	9,78	26,07	16,68	16,57	13,32	13,22	10,77	10,35	10,59
	15 %	9,76	25,82	18,89	19,19	13,84	13,74	10,69	10,35	10,59
	20 %	9,67	25,72	22,07	22,25	13,96	13,86	10,31	10,35	10,59
	25 %	9,64	25,57	23,66	23,82	14,37	14,27	10,20	10,35	10,59

Cuadro 5.8: Presiones en m.c.a. Teórica y experimental.

Vamos a comparar las presiones experimentales con lo que dicta el modelo analítico. Para facilitar esta comparación hemos representado gráficamente la presión experimental y la teórica en un gráfico para distintos niveles de apertura y en los diferentes puntos de la instalación.

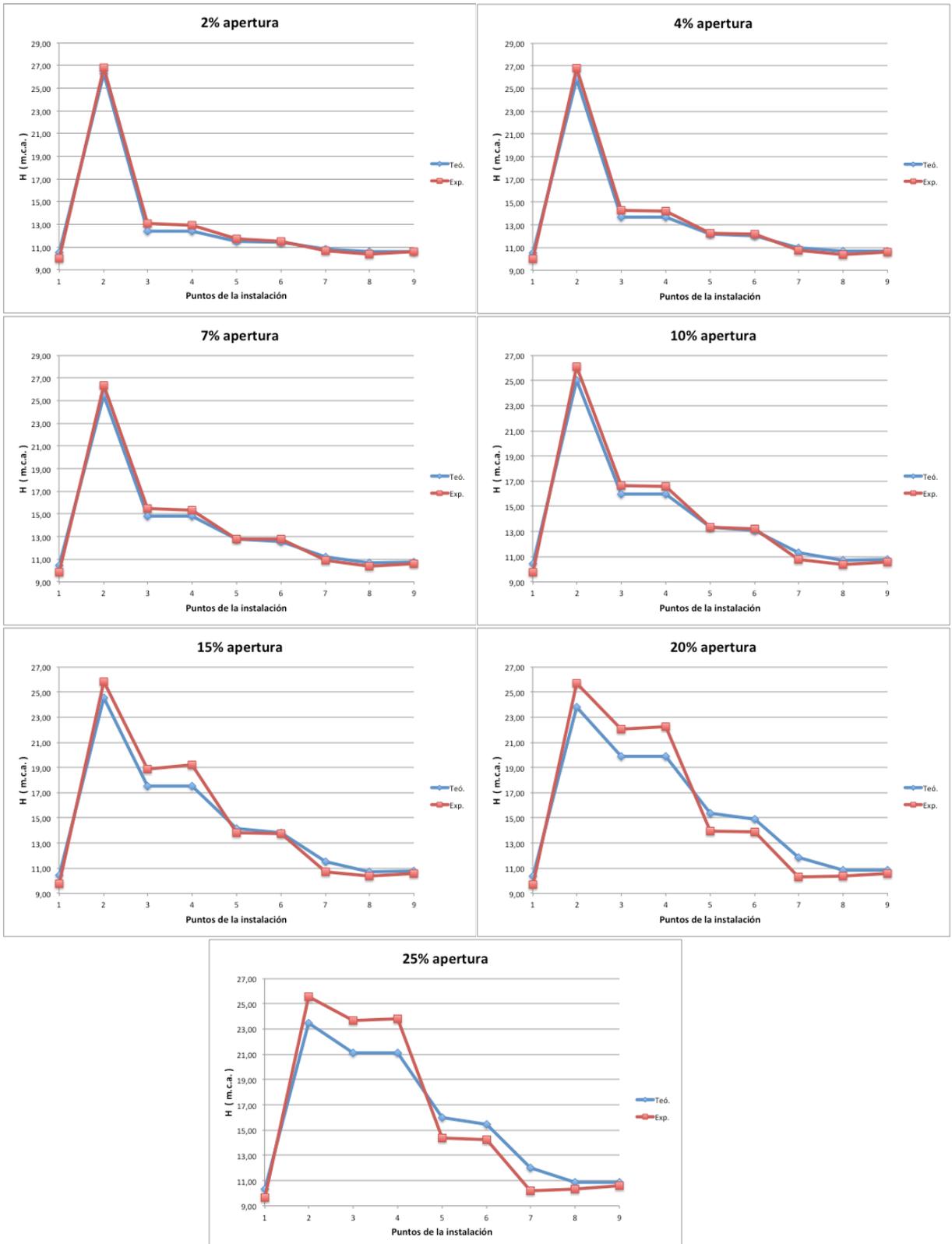


Figura 5.7: Comparación del modelo analítico con el experimental.

Observamos como, a partir de la apertura del 15 %, la presión analítica, comienza a variar significativamente con respecto a la experimental sobre todo en los puntos 3, 4 y 5 del Venturi. Esto es debido a que la cavitación está presente en la garganta del Venturi y el modelo calcula un caudal distintos al experimental y, por tanto, unas presiones también diferentes.

En cambio, en los puntos 8a y 8b(en la gráfica 9) el error es pequeño debido a que la presión en este punto(8b) es la condición de contorno del modelo y el caudal está calculado en base a esta presión de salida.

Se ha calculado el error relativo entre las presiones calculadas por el modelo y las medidas experimentalmente.

ERROR		H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7	H_{8b}
Apertura	2 %	5,80 %	2,09 %	5,15 %	4,06 %	1,70 %	0,32 %	1,68 %	0,39 %
	4 %	5,34 %	3,84 %	4,34 %	3,60 %	0,82 %	1,21 %	2,16 %	0,62 %
	7 %	6,16 %	3,44 %	4,29 %	3,06 %	0,21 %	1,76 %	2,74 %	1,33 %
	10 %	6,96 %	3,96 %	4,27 %	3,59 %	0,23 %	0,91 %	5,37 %	1,62 %
	15 %	6,75 %	5,01 %	7,07 %	8,50 %	2,15 %	0,51 %	7,86 %	1,73 %
	20 %	7,16 %	7,41 %	9,75 %	10,49 %	9,99 %	7,63 %	15,16 %	2,57 %
	25 %	7,16 %	8,28 %	10,69 %	11,31 %	11,15 %	8,46 %	17,99 %	2,84 %

Cuadro 5.9: Error relativo del modelo analítico.

El error relativo ha sido calculado como,

$$error\ relativo(\%) = \frac{H_{teó} - H_{exp}}{H_{exp}} \cdot 100$$

En la tabla anterior vemos que para los niveles de apertura mayores al 15 % el error en la garganta y en los puntos aguas abajo se dispara. Esto es debido a que la cavitación está bastante desarrollada y, por tanto, el modelo deja de ser válido.

Resumiendo, el modelo es capaz de estimar la presión en m.c.a en cualquier punto de la instalación, siempre y cuando no exista cavitación en la garganta del Venturi, con un error menor al 7 %.

5.6. Comparación de la cavitación detectada experimentalmente con la predicción analítica.

El propósito de este trabajo gira entorno a la predicción de la cavitación, por tanto, las conclusiones de esta sección son clave para la conclusión final.

En las secciones previas a ésta se ha validado la capacidad del modelo matemático para predecir caudales y presiones en toda la instalación. Pero no hemos comprobado directamente como se ajusta la presión estática calculada por el modelo en la garganta con la presión medida experimentalmente en este mismo punto. Por lo cual, en esta sección vamos a estudiar más detalladamente la evolución de la presión en la garganta del Venturi(punto 4) comprobando si lo que estima el modelo se cumple en la experimentación.

Predicción del modelo analítico

Mostramos en la siguiente tabla las presiones estáticas en la garganta obtenidas mediante el modelo matemático para los niveles de apertura más usados en los ensayos experimentales.

Apertura	P_4 teórica(Pa)	Q teórico(l/min)	CAVITACIÓN
2 %	70.143	21,48	NO
4 %	48.569	27,90	NO
7 %	30.645	32,40	NO
10 %	11.314	36,54	NO(ruido)
15 %	-16.344	41,70	SI
20 %	-55.531	48,18	SI
25 %	-76.177	51,24	SI

Cuadro 5.10: Presiones analíticas en la garganta(presiones absolutas). $z_0 = 24,5 \text{ cm}$

Al igual que en la sección 4.3, se observa como entre el 10 % y el 15 % de apertura la presión desciende por debajo de la presión crítica llegando a ser negativa, algo que, como ya se comentó, es físicamente imposible.

Representando la presión teórica en la garganta frente al nivel de apertura de la válvula,

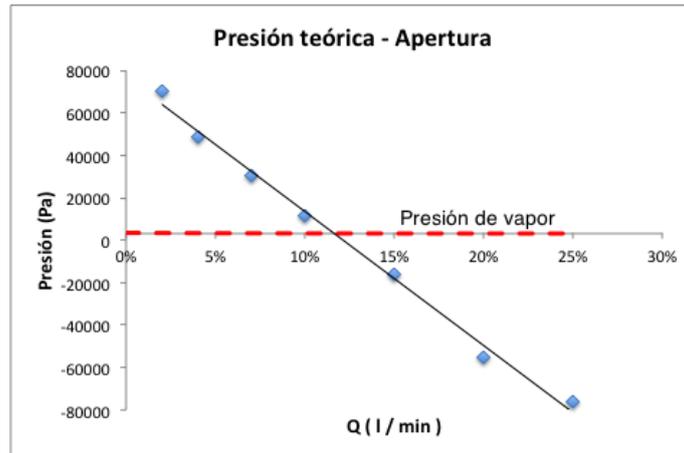


Figura 5.8: Presiones analíticas frente al nivel de apertura.

se observa como la apertura de la válvula conlleva una disminución lineal de la presión, sin ningún tipo de restricción, llegando ésta a valores muy por debajo de la presión de vapor (línea a trazos rojos en la gráfica).

Para calcular el punto de inicio de la cavitación se llevó a cabo un proceso iterativo en la sección Cálculo del inicio de la cavitación que predijo una apertura de la válvula, aproximadamente, del 11,5 %. Recordamos a continuación las condiciones:

Apertura de la válvula: 11,5 % $\rightarrow K_v(11,5\%) = 50$

Caudal: $Q = 38,04 \text{ l/min}$

Presión en la garganta del Venturi: $P_4 = 3376 \text{ Pa}$

Presión atmosférica: $P_a = 101325 \text{ Pa}$

Presión de descarga: atmosférica, P_a

Temperatura del agua: $T_{func} = 25^\circ\text{C}$

Presión de vapor a 25°C : $P_v = 3169 \text{ Pa}$

Ensayos experimentales

Las presiones experimentales recogidas durante el Ensayo II ($z_0 = 24,5 \text{ cm}$) son las siguientes,

Apertura	$P_4 \text{ exp. (Pa)}$	$Q \text{ exp (l/min)}$	CAVITACIÓN
2 %	75.994	21,33	NO
4 %	53.329	27,94	NO
7 %	33.997	32,58	NO
10 %	13.999	36,94	NO(ruido)
15 %	3.999	41,21	SI
20 %	3.999	44,48	SI
25 %	3.999	46,07	SI

Cuadro 5.11: Presiones experimental en la garganta(presiones absolutas)

Ahora, representamos los datos experimentales al igual que en el apartado anterior frente al nivel de apertura.

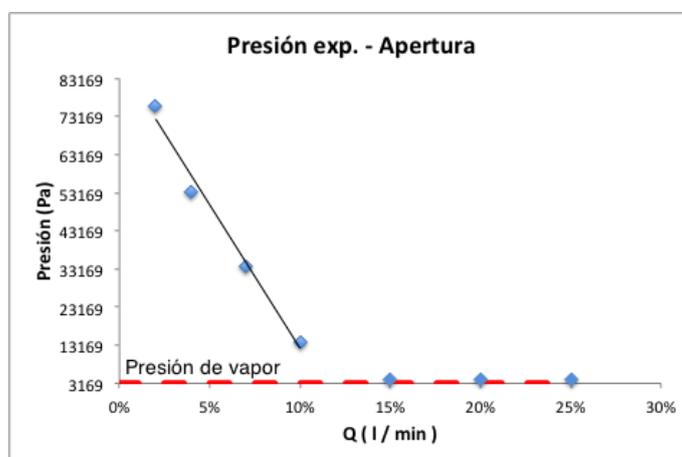


Figura 5.9: Presiones experimental frente al caudal experimental.

En este caso, la presión no desciende por debajo de los 3999 Pa debido a que ha llegado a una presión muy cercana a la presión vapor ($P_v = 3169 \text{ Pa}$); esta anticipación de la cavitación es debida a la presencia de gas disuelto (aire) en el agua. Como se expuso en el Capítulo 2, esta cavitación es del tipo heterogénea, pues el origen de la microcavidad es el gas disuelto.

De los resultados experimentales podemos decir varias cosas:

- Para un 10 % de apertura comienza el ruido y las vibraciones típicas de la cavitación. Aunque la presión no está cerca de la de vapor puede que algunas zona la presión descienda localmente algo más y, por tanto, se oiga este característico ruido.
- Para los niveles entre el 10 %-15 % la cavitación es inestable y se producen desprendimientos de la nube de vapor. Por tanto, el tipo de cavitación según el carácter macroscópico es cavitación de nube (sección 2.1 en la página 4).

- Para un 15 % de apertura, aproximadamente, la nube de vapor es estable y su crecimiento longitudinal es prácticamente lineal (Figura 5.3 en la página 71) hasta un 25 % de apertura, en el cual llega a su máxima longitud. Por el modo de crecimiento de la nube de vapor estamos ante una situación de pseudo-cavitación, ya que el crecimiento es a causa de la diferencia de presiones existente entre los pequeños núcleos de aire disueltos en el agua y la zona de baja presión(garganta del Venturi)[5].
- A partir de un 25 %, no importa el nivel de apertura de la válvula pues el caudal se bloquea y las presiones también.

Diferencias entre la predicción y la experimentación

La diferencia notable entre las gráficas anteriores se manifiesta en el tramo final. Otra forma de apreciar esta diferencia entre predicción y experimentación es representando la presión experimental y la calculada por el modelo en la garganta para sus respectivos caudales como se muestra en la siguiente gráfica,

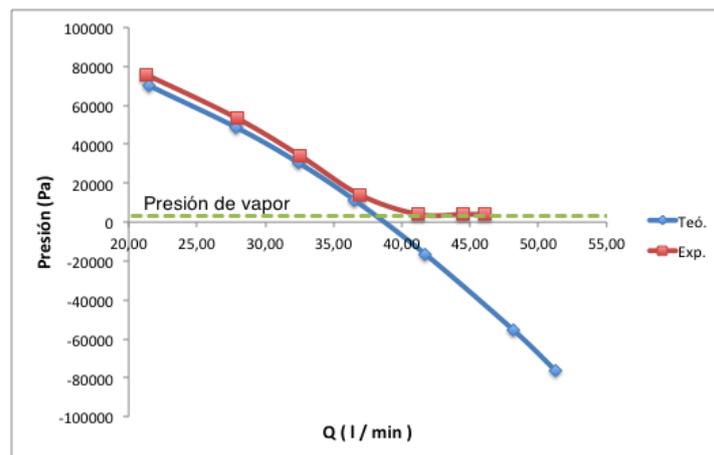


Figura 5.10: Comparación de las presiones estáticas en la garganta del Venturi.

Con esta gráfica apreciamos de nuevo como el modelo analítico no tiene ninguna restricción que le impida descender por debajo de la presión de vapor(línea horizontal a trazos de la gráfica). Aproximadamente, a partir de 38 l/min el modelo analítico deja de ser válido, pues como observamos comienzan a separarse significativamente ambas curvas. Además, los caudales estimados por el modelo comienzan a ser significativamente mayores a los medidos en la instalación como se comprobó en la sección Cálculo del caudal analítico.

La cavitación según la estimación del modelo comienza para un 11,5 % de apertura y un caudal de 38,04 l/min. Esto concuerda perfectamente con lo obtenido en la experimentación, puesto que para un 10 % de apertura y un caudal de 36,94 l/min comienzan a presentarse síntomas del inicio de la cavitación(ruido y vibraciones) y

para un 15 % de apertura y un caudal de 41,21 l/min la cavitación es estable y puede apreciarse visualmente. Se ha comprobado experimentalmente que para una apertura aproximada del 11,5 % la cavitación en la garganta existe pero es inestable.

Por tanto, como el objetivo de este modelo es el de estimar la presión en la garganta del Venturi para concluir si existe o no el fenómeno de la cavitación, estamos frente a un modelo válido y bastante aproximado, pues si la presión en la garganta estuviese por debajo de la de vapor podríamos concluir con cierta seguridad que el fenómeno de la cavitación está presente en la instalación. Además, el modelo es de corte conservador puesto que siempre arroja valores de presión algo por debajo de la real.

5.7. Métodos para detectar la cavitación

Con todo lo expuesto en este trabajo y con los experimentos desarrollados en el laboratorio podemos listar varios métodos para detectar la cavitación en una instalación hidráulica:

- Ruido: como ya hemos dicho es el síntoma más claro y en muchos casos el único que se pueda percibir. El ruido va acompañado de vibraciones en la máquina o tubería afectadas. El ruido y las vibraciones, en nuestros ensayos con el tubo de Venturi, comienzan para una apertura del 10 %.
- Visual: si tenemos acceso a la zona crítica de la tubería donde el flujo pudiera acelerarse, podremos apreciar a simple vista si se manifiesta la cavitación. En nuestro caso particular, la cavitación inestable comienza en la garganta del Venturi para una apertura superior al 10 % de la válvula y se estabiliza aproximadamente en un 15 % de apertura aunque no está completamente desarrollada hasta el 25 %.
- Gráfico: si el riesgo de cavitación está en un Venturi, como es el caso de nuestro estudio, podemos saber si existe cavitación a través de la gráfica que representa la relación de presiones aguas arriba y abajo frente al caudal pues existe un cambio en la pendiente, como se aprecia en la gráfica 5.4 en la página 72. El cambio de pendiente se produce aproximadamente para un $P_5/P_3 = 0,85$ que corresponde con un 10 % del nivel de apertura de la válvula. Esta relación de presiones crítica puede obtenerse numéricamente a través de la ecuación 2.19 en la página 22.
- Analítico: éste tal vez sea el método más largo pues se necesita información muy detallada sobre la instalación. Desarrollando un modelo analítico como el expuesto en este trabajo(4.1 en la página 54) se puede calcular la presión en cualquier punto de la instalación y, comparándola con la presión de vapor del fluido a la temperatura de funcionamiento, deducir si hay riesgo de cavitación

o no. Nuestro modelo predijo que para una apertura del 11,5% y un caudal de 38,04 *l/min* se produce el inicio de la cavitación.

Por tanto, todos los métodos para predecir la cavitación citados concuerdan entre ellos por lo que podemos considerarlos como válidos para detectar este fenómeno.

Capítulo 6

Resumen de los resultados y conclusiones

En este último capítulo vamos a recopilar toda la información expuesta en el trabajo con el objetivo de mostrarlos de forma clara y simplificada.

En primer lugar comenzamos comentado la caracterización de la instalación. Se puede dividir en tres fases: caracterización del diafragma, curva característica de la bomba y caracterización de la válvula de membrana. Comentamos cada una de ellas detalladamente.

- Caracterización del diafragma.
 - Este elemento ha sido de gran utilidad para medir el caudal de forma rápida y precisa.
 - El error relativo en el caudal es siempre menor al 5% como se aprecia en la tabla 3.10 en la página 48.
 - El coeficiente de descarga es $C_d = 0,62$ fue calculado en la sección 3.6.1 en la página 42.
 - La constante de pérdidas de carga corregida es $K_{diafragma} = 11,54$
- Curva característica de la bomba.
 - Obtener esta ecuación nos ha permitido conocer el salto de presión introducido por la bomba en función del caudal circulante por la instalación.
 - La curva característica fue calculada en la sección 3.6.2 en la página 49 y viene dada por, $H_b(Q) = 16,706 - 0,0289Q - 0,0008Q^2$.
 - El coeficiente de determinación, más conocido como R cuadrado, el cual mide la bondad del ajuste tiene un valor bastante próximo a la unidad ($R^2 = 0,9937$) por lo que la ecuación anterior se ajusta bastante bien a los datos experimentales.

- Existen diferencias significativas con las curvas del catálogo de la marca pero que atribuimos a que la bomba de la instalación tiene un impulsor distinto al original o mecanizado.
- Caracterización de la válvula de membrana (Anexo B en la página 95).
 - El valor de la $K_{válvula}$ es imprescindible para el modelo analítico de presión y cálculo de caudales, puesto que la mayor parte de las pérdidas en la instalación son introducidas por este elemento. Debido a la falta de información técnica sobre la válvula se ha recurrido a una caracterización experimental que aparece en el Anexo. El valor de la $K_{válvula}$ ha sido obtenido para diferentes grados de apertura de la válvula. En la siguiente tabla resumimos los valores de este parámetro. Para valo-

Apertura	$K_{válvula}$	Apertura	$K_{válvula}$	Apertura	$K_{válvula}$
2 %	262	10 %	58	18 %	20
3 %	190	11 %	52	19 %	16
4 %	135	12 %	47	20 %	13
5 %	110	13 %	41	21 %	10
6 %	98	14 %	38	22 %	9
7 %	87	15 %	33	23 %	8
8 %	75	16 %	29	24 %	7
9 %	67	17 %	25	25 %	6

Cuadro 6.1: Pérdidas de carga en la válvula de membrana.

res mayores al 25 % la siguiente correlación nos da un valor aproximado, $K_{válvula}(\%apertura) = -0,0787 \cdot \%apertura + 7,97$.

Tras la caracterización de la instalación, pasamos a explicar los resultados del modelo analítico para el cálculo de caudales y presiones.

- Modelo analítico para el cálculo de caudales y de presiones.
 - Este modelo matemático es capaz de estimar los caudales para diferentes grados de apertura de la válvula de membrana con un error inferior al 1,2 % siempre que no exista cavitación en la garganta. Si fuera así, el modelo deja de ser válido pues sus ecuaciones no tienen en cuenta el bloqueo del flujo que supone la presencia de la cavitación. Los cálculos aparecen en la sección 4.2 en la página 58.
 - El modelo también es capaz de calcular el inicio de la cavitación en la garganta del Venturi. Según los resultados de la sección 4.4 en la página 61 la formación de este fenómeno comienza para una apertura de un 11 % lo que concuerda perfectamente con la experimentación, puesto que según

los resultados del laboratorio en la sección 5.3.1 en la página 70, para un 10% de apertura se comienza a escuchar el ruido característico de este fenómeno aunque la nube de vapor no está presente aun.

- Además, se han calculado la presiones absolutas en m.c.a de todos los puntos característicos de la instalación haciendo uso de este mismo modelo. Los resultados analíticos han sido comparados con los medidos experimentalmente en la sección 5.5 en la página 76. Los errores cometidos en los casos sin cavitación son relativamente pequeños mientras que una vez que la cavitación aparece el modelo deja de ser válido y el error aumenta significativamente.

Como hemos visto, otro parámetro importante en la cavitación es el número adimensional σ del cual podemos decir lo siguiente.

- Parámetro de la cavitación, σ (4.5 en la página 65).

Hemos comprobado la eficacia de este número adimensional, también conocido como coeficiente de Thomas, para determinar la presencia de la cavitación usando los datos proporcionados por el modelo analítico. Si repasamos la teoría expuesta en el Capítulo 2 recordamos que la condición de cavitación era que $\sigma \leq -(C_p)_g$, donde $(C_p)_g$ era el coeficiente adimensional de presión que en este caso dependía únicamente de la geometría pues se podía calcular como $(C_p)_g = 1 - (A_\infty/A_g)^2 = -16,36$.

Este parámetro σ es mucho más útil en flujos externos donde la presión aguas arriba se mantiene constante como, por ejemplo, la entrada a una bomba.

Por último, y para concluir con este trabajo resumimos las conclusiones que de éste se derivan:

- La cavitación no se produce justo cuando la presión alcanza la presión de vapor para esa temperatura. En nuestros ensayos la cavitación aparece antes debido posiblemente al aire disuelto en el agua que favorece el inicio de este fenómeno. Por tanto, podemos concluir que se trata de un tipo de cavitación heterogénea donde los puntos de inicio de la nucleación son las partículas de aire disueltas.
- El carácter macroscópico de la cavitación en este Venturi es el de cavitación de nube(Figura 2.1 en la página 4).
- Cuando la cavitación comienza, la presión en la garganta es próxima a la de vapor y permanece constante aunque aumentemos la presión aguas arriba.
- La cavitación conlleva la aparición de una nube de vapor en la garganta del Venturi que se prologa hasta la zona donde la presión vuelve a un nivel por encima de la presión de vapor. El modo de crecimiento de la nube determina

que estamos ante una pseudo-cavitación pues el crecimiento es a causa de la diferencia de presiones entre los núcleos de aire disueltos y la zona de baja presión. Consideramos despreciable la transferencia de masa en la interfase más propia de la cavitación vaporosa y gaseosa [3][5].

- Existe una relación de presiones aguas arriba y abajo, próxima a $P_5/P_3 \approx 0,85$, o también, $(P_3 - P_5)/P_3 \approx 0,15$, que bloquea el caudal que circula por la instalación. Este bloqueo se presenta cuando la cavitación ya está desarrollada en la garganta y es la presencia de la nube de vapor la que impide que el flujo aumente por encima de un cierto valor. El resultado de esta relación puede obtenerse numéricamente como se ha visto en la sección 5.4 en la página 74 en la cual fue necesario también el cálculo de la constante de pérdidas de carga del Venturi cuyo valor es $K_p = 2,44$.
- Aunque la cavitación en la mayoría de los casos es un inconveniente, el bloqueo del caudal que genera en los tubos de Venturi puede usarse para algunas aplicaciones concretas como se comentó en 2.7.2.1 en la página 23. Recordamos algunas de ellas:
 - Limitadores de flujo.
 - Inyectores.
 - Controladores de mezcla.
 - Sistemas de extinción de fuegos.
- Nombramos los métodos para detectar la cavitación en una instalación hidráulica explicados en la sección 5.7 en la página 84:
 - Detección por ruido y vibraciones: este fenómeno tiene un ruido muy característico.
 - Detección visual: cuando la nube de vapor es visible a simple vista.
 - Detección gráfica: mediante las gráficas de la relación de presiones frente al caudal (este método es solo válido en tubos de Venturi).
 - Detección analítica: desarrollando un modelo analítico que permita calcular la presión en cualquier punto.

Anexo

Apéndice A

Cálculo de la presión

Para realizar estos cálculos evitando errores se ha optado por un software de cálculo.

Todas las constantes de pérdidas de carga que en este Anexo se utilizan han sido obtenidas de la bibliografía y aparecen en la sección Elementos de la instalación a excepción de la del diafragma, la cual ha sido levemente modificada para conseguir un mejor ajuste del modelo pues tomando $K_d = 11,54$ en vez de 9,88 como dictaba la bibliografía se consigue que la predicción a través del modelo analítico concuerde mejor con la experimentación.

$$Pa:=101325$$

$$\text{densidad}:=998$$

$$g:=9,81$$

$$Kcodo:=1,12$$

$$Kestrechamiento:=0$$

$$Kensanchamiento:=0.$$

$$Kdiafragma:=11,54$$

$$Kvesfera:=0,1$$

$$Kconvergencia:=0$$

$$Kdivergencia:=0,18$$

$$Kt:=1,2$$

$$\text{Lambda25}:=0,02375$$

$$\text{Lambda32}:=0,02514$$

$$H0:=\frac{Pa}{\text{densidad}*g} + z0$$

$$H1:=H0 - \frac{Q^2}{g} * \left(\frac{8*\text{Lambda32}*0,15}{\text{Pi}^2*0,0272^5} + \frac{8*2*Kcodo}{\text{Pi}^2*0,0272^4} \right)$$

$$H2:=H1 + (16,706 - 0,0289 * 60000 * Q - 0,0008 * (60000 * Q)^2)$$

$$H3:=H2 - \frac{Q^2}{g} * \left(\frac{8*\text{Lambda25}*0,235}{\text{Pi}^2*0,0212^5} + \frac{8*Kcodo}{\text{Pi}^2*0,0272^4} + \frac{8*Kcodo}{\text{Pi}^2*0,0212^4} + \frac{8*Kvalvula}{\text{Pi}^2*0,0212^4} + \frac{Kestrechamiento}{2*(0,025*0,006)^2} \right)$$

$$H4:=H3 - \frac{Q^2}{g} * \left(\frac{Kconvergencia}{2*(0,006*0,006)^2} \right)$$

$$H5:=H4 - \frac{Q^2}{g} * \left(\frac{Kdivergencia}{2*(0,006*0,006)^2} \right)$$

$$H6:=H5 - \frac{Q^2}{g} * \left(\frac{8*\Lambda_{25,48}}{\pi^2*0,0212^5} + \frac{8*Kcodo}{\pi^2*0,0212^4} + \frac{Ksanchamiento}{2*(0,025*0,006)^2} \right)$$

$$H7:=H6 - \frac{Q^2}{g} * \left(\frac{8*Kdiafragma}{\pi^2*0,0212^4} \right)$$

$$H8a:=H7 - \frac{Q^2}{g} * \left(\frac{8*\Lambda_{25,3}}{\pi^2*0,0212^5} + \frac{8*2*Kt}{\pi^2*0,0212^4} + \frac{8*Kvesfera}{\pi^2*0,0212^4} + \frac{8*Kcodo}{\pi^2*0,0212^4} \right)$$

$$H8b:=H7 - \frac{Q^2}{g} * \left(\frac{8*\Lambda_{25,24}}{\pi^2*0,0212^5} + \frac{8*Kt}{\pi^2*0,0212^4} + \frac{8*Kvesfera}{\pi^2*0,0212^4} + \frac{8*2*Kcodo}{\pi^2*0,0212^4} \right)$$

Sustituyendo los valores de las constantes tenemos las siguientes expresiones:

$$H0 = z0+10.3494$$

$$H1 = -359066. Q^2+z0+10.3494$$

$$H2 = -3.23907 \cdot 10^6 Q^2 - 1734. Q+z0 + 27.0554$$

$$H3 = (-409051. Kvalvula - 3.97396 \cdot 10^6) Q^2 - 1734. Q+z0+27.0554$$

$$H4 = (-409051. Kvalvula - 3.97396 \cdot 10^6) Q^2 - 1734. Q+z0+27.0554$$

$$H5 = (-409051. Kvalvula - 1.10529 \cdot 10^7) Q^2 - 1734. Q+z0+27.0554$$

$$H6 = (-409051. Kvalvula - 1.17310 \cdot 10^7) Q^2 - 1734. Q+z0+27.0554$$

$$H7 = (-409051. Kvalvula - 1.64515 \cdot 10^7) Q^2 - 1734. Q+z0+27.0554$$

$$H8a = (-409051. Kvalvula - 1.80697 \cdot 10^7) Q^2 - 1734. Q+z0+27.0554$$

$$H8b = (-409051. Kvalvula - 1.80095 \cdot 10^7) Q^2 - 1734. Q+z0+27.0554$$

Apéndice B

Cálculo de la $K_{válvula}$

El valor de las pérdidas de carga introducidas por una válvula están ligadas estrechamente a la geometría y, por tanto, cada tipo de válvulas se comportan de manera muy distinta ante las pérdidas de presión. La forma más exacta de obtener este parámetro pasa por la experimentación ya que plantear un modelo analítico conduce a un modelo demasiado complejo que no siempre arroja resultados coherentes. Con el desarrollo de la mecánica de fluidos computacional también existen programas basados en los elementos finitos que son capaces de aproximar con un error pequeño este tipo de parámetros, pero no profundizaremos en este tema ya que no es el objetivo de este trabajo.

En este Apéndice calcularemos la constante de pérdidas, $K_{válvula}$. El modo de cálculo será el siguiente: a partir del modelo analítico de la presión establecemos la condición en el punto más cercano tras la válvula (punto 3) puesto que conocemos la presión experimental y despejamos la $K_{válvula}$ ya que la altura de agua en el depósito, z_0 , es conocida y el caudal, Q , lo determinamos gracias al diafragma. Operando de esta forma y no con la condición de contorno al final de la tubería evitamos incluir pérdidas en la válvula que no pertenecen a ella.

Tenemos expresada la presión tras la válvula en función del caudal, altura de agua en el depósito y constante de la válvula a través de esta ecuación,

$$H_3 = (-3,97396 \cdot 10^6 - 409051 K_{válvula}) Q^2 - 1734Q + 27,0554 + z_0 \quad (\text{B.1})$$

y por Bernoulli sabemos que debe de ser,

$$H_3 = \frac{P_a + P_{man,3}}{\rho g} + \frac{1}{2g} \left(\frac{Q}{A} \right)^2 + z_3 \quad (\text{B.2})$$

donde P_{man} es la presión manométrica relativa a la atmósfera que proporciona el manómetro tipo Bourdon.

Igualando ambas expresiones, sustituyendo los caudales más comunes en los ensayos realizados y tomando una altura media, $z_0 = 24,5\text{ cm}$, obtenemos los siguientes valores para $K_{v\acute{a}lvula}$,

Apertura vál.(%)	$Q(l/min)$	$P_{man,3}(mca)$	$K_{v\acute{a}lvula}$
2%	21,33	2	265,67
4%	27,94	3	136,56
7%	32,58	4	88,05
10%	36,94	5	58,68
15%	41,21	7	33,90
20%	44,48	10	13,72
25%	46,07	11,5	5,6
100%	46,07	11,5	5,6

Cuadro B.1: Constante de pérdidas de carga de la válvula de membrana.

Se observa en la tabla B.1 que para cada valor de la constante de pérdidas se ha asociado un nivel de apertura de la válvula, el cual ha sido calculado comparando con el total de vueltas(3 vueltas) hasta la apertura completa de la válvula. Todas las constantes calculadas, excepto la última, son para un grado de apertura que no supera una vuelta completa puesto que al llegar a una apertura del 25%, aproximadamente, el caudal en la instalación se ha bloqueado porque la cavitación aparece en la garganta del Venturi y, a pesar de abrir completamente la válvula, no se consigue aumentar el caudal.

Esta caracterización debería haberse realizado con el tramo recto de tubería en lugar del Venturi pues de esta manera no hemos obtenido valores válidos por encima del 25%. El motivo de no haberlo realizado de esta manera ha sido porque el tubo recto no dispone de ninguna toma de presión por lo que la medida aguas abajo de la válvula hubiera tenido que ser tomada en el punto 6, justo delante del diafragma, y esto hubiera incorporado pérdidas a la válvula que no le corresponden. Aun y así, como el objetivo del modelo analítico de distribución de presiones es el de detectar la cavitación, la cual aparece por debajo del 25% de apertura de la válvula, no necesitamos valores de $K_{v\acute{a}lvula}$ por encima de este nivel de apertura.

En la siguiente gráfica vamos a representar el valor de $K_{v\acute{a}lvula}$ frente al grado de apertura de la válvula. A partir del gráfico se ha intentado obtener distintas correlaciones(exponenciales, logarítmicas, potenciales,...) pero no se ha conseguido un buen ajuste para todas las aperturas, por tanto, se ha optado por tabular la $K_{v\acute{a}lvula}$ a partir de la gráfica en la siguiente tabla.

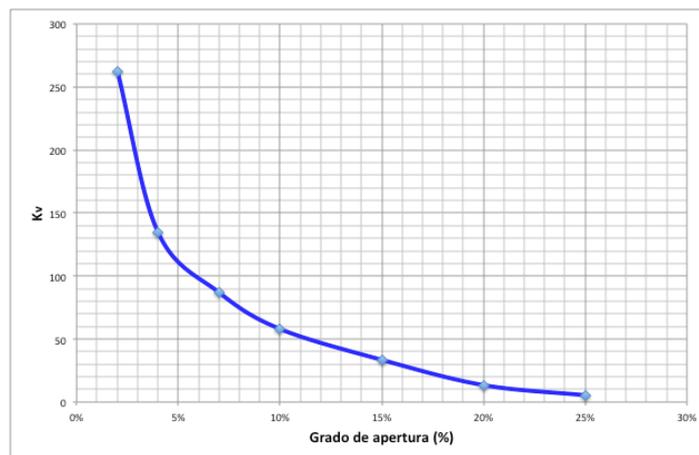


Figura B.1: Correlación entre $K_{válvula}$ y el grado de apertura.

Apertura	$K_{válvula}$	Apertura	$K_{válvula}$	Apertura	$K_{válvula}$
2 %	262	10 %	58	18 %	20
3 %	190	11 %	52	19 %	16
4 %	135	12 %	47	20 %	13
5 %	110	13 %	41	21 %	10
6 %	98	14 %	38	22 %	9
7 %	87	15 %	33	23 %	8
8 %	75	16 %	29	24 %	7
9 %	67	17 %	25	25 %	6

Cuadro B.2: $K_{válvula}$ para diferentes grados de apertura.

Viendo la tendencia lineal que presentan los últimos valores se va a realizar una extrapolación para aproximar la constante de pérdidas para valores superiores al 25 %, considerando que para una apertura del 100 % la constante es igual a $K_{válvula} = 0,1$.

La expresión en función de la apertura para valores mayores al 25 % quedaría como $K_{válvula}(\%apertura) = -0,0787 \cdot \%apertura + 7,97$ siendo $\%apertura > 25\%$.

Los últimos Anexos son guiones de prácticas que pueden ser utilizados para el desarrollo de prácticas de laboratorio donde se utilice esta instalación. Se han dividido en 4 prácticas:

1. Caracterización del diafragma.
2. Curva característica de la bomba.
3. Modelado de la instalación.
4. Detección de la cavitación.

La información de estos guiones de prácticas está sacada del propio trabajo y de la bibliografía adjunta[7].

Apéndice C

Guión de prácticas 1: Caracterización diafragma.

C.1. Objeto de la práctica.

Caracterizar el diafragma mediante su coeficiente de descarga, C_d , para conocer el caudal circulante por la instalación.

C.2. Fundamento teórico.

Si planteamos en el diafragma la ecuación de Bernoulli, estando el punto 1 aguas arriba y 2 aguas abajo(Figura C.1), obtenemos que la velocidad teórica es,

$$v_{2t} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{2 \frac{(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (\text{C.1})$$

sabiendo que el caudal se conserva, $Q = v_1 A_1 = v_2 A_2$. Recordar que si la diferencia de presión, $P_2 - P_1$, se expresa en diferencia de metros de columna de agua, Δh , la expresión cambia a,

$$v_{2t} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{2g\Delta h} \quad (\text{C.2})$$

Normalmente 1 se encuentra a un diámetro de distancia del orificio y 2 a medio diámetro intentado coincidir con la sección mínima de la vena contracta [15]. En nuestro caso ambos se encuentran aproximadamente a 25 mm. Añadir que A_2 no es

la sección mínima generada por el efecto de la vena contracta sino que la tomamos como la sección mínima de paso del diafragma por ser esta un valor conocido; a cambio, intentaremos corregir esta aproximación de la forma que comentamos en el párrafo siguiente.

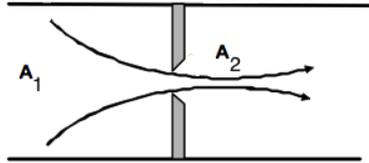


Figura C.1: Esquema de un diafragma.

Para que la velocidad sea la real tendremos que tener en cuenta las consecuencias provocadas por el efecto de la vena contracta con el coeficiente de contracción C_c y de la turbulencia y viscosidad con el coeficiente de velocidad, C_v . El producto de estos dos coeficientes adimensionales es conocido como coeficiente de descarga, C_d . Es fácil demostrar que este parámetro adimensional es una función de la geometría y del número de Reynolds[18].

La forma de calcular este parámetro es estrictamente experimental; los datos empíricos se han tabulado en gráficas y, también, se han establecido correlaciones numéricas para un cálculo más preciso, las cuales aparecen en cualquier bibliografía básica sobre el tema [18] o en normas [10].

Resumiendo, la velocidad real en el diafragma quedaría expresada como,

$$v_{2r} = \frac{C_d}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{2g\Delta h} \quad (C.3)$$

y el caudal real se obtiene multiplicando por la sección.

$$Q_r = \frac{C_d A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{2g\Delta h} \quad (C.4)$$

Como queremos determinar el coeficiente de descarga, lo despejamos de la expresión anterior donde el caudal lo hallaremos mediante el uso del depósito calibrado.

$$C_d = \frac{Q_r}{A_2 \sqrt{2g\Delta h}} \sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2} \quad (C.5)$$

Por tanto, durante los ensayos tendremos que medir el cambio de presión a ambos lados del diafragma expresándolo en m.c.a y el caudal real con el depósito calibrado, además de conocer la geometría del diafragma. Cuando hayamos determinado experimentalmente y verificado con la bibliografía el coeficiente de descarga, estaremos

en condiciones de determinar el caudal para cualquier configuración aplicando la ecuación C.4.

C.3. Descripción de la instalación.

El equipo va montado sobre un panel horizontal de 600x900mm con cuadro de perfiles de aluminio. Sobre el panel tenemos el depósito, la bomba y la instalación.

El depósito consta de dos compartimentos, uno superior y otro inferior. El superior es utilizado para realizar lecturas volumétricas para la medida del caudal y como separador de aire cuando se realiza el vacío en el depósito inferior. El compartimento inferior es el depósito de aspiración en el que se puede modificar su presión.

El equipo dispone de una bomba que aspira del depósito e impulsa el líquido a través de la instalación, volviendo el mismo al punto de partida, con lo que tenemos un sistema de circuito cerrado. La lectura del caudal se puede realizar tanto de forma volumétrica como con el diafragma existente a la salida de la bomba. Este diafragma tiene un rango de lectura de 800 a 2500 l/h.

Para la demostración del teorema de Bernoulli utilizamos un tubo de Venturi de sección circular a lo largo del cual tenemos una serie de tomas de presión conectadas a un manómetro diferencial de columna de agua. Gracias al estrechamiento inicial y al posterior ensanchamiento del tubo de Venturi, podemos observar como la presión estática disminuye con la sección de paso y aumenta cuando ésta lo vuelve a hacer. Esta disminución de la presión, es medida por un manómetro diferencial de agua que consta de un total de 7 bulbos, 5 de los cuales son para la demostración del Teorema de Bernoulli y los otros 2 para la utilización del diafragma como caudalímetro. Para la regulación del caudal se utiliza una válvula de membrana que permite un ajuste fino del mismo.

En la garganta del Venturi de sección rectangular podemos conseguir una depresión suficiente como para observar el fenómeno de la cavitación. Para una correcta observación del mismo, se ha construido el Venturi de metacrilato. El equipo cuenta además con un manómetro y un vacuómetro con los que podemos medir las sobrepresiones y depresiones producidas. También es posible cambiar las condiciones de presión en el depósito de aspiración, con lo que tenemos la oportunidad de estudiar el fenómeno para diferentes caudales y presiones.

La siguiente imagen es un esquema de la instalación y de sus puntos más significativos.

LISTADO DE PUNTOS CARACTERÍSTICOS.

- Punto 0: fondo del depósito.
- Punto 1: aspiración de la bomba.

- Punto 2: impulsión de la bomba.
- Punto 3: entrada a la zona convergente del Venturi.
- Punto 4: garganta del Venturi.
- Punto 5: salida de la zona divergente del Venturi.
- Punto 6: aguas arriba del diafragma.
- Punto 7: aguas abajo del diafragma.
- Punto 8a: retorno superior al depósito.
- Punto 8b: retorno inferior al depósito.

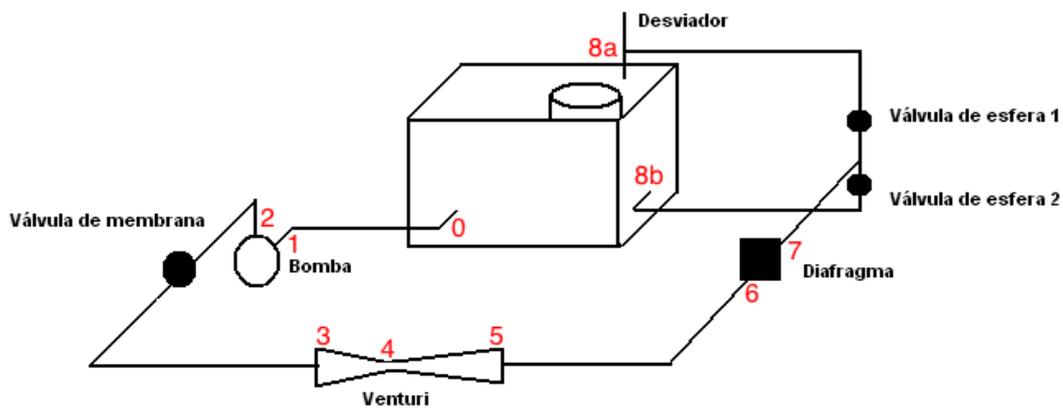


Figura C.2: Puntos más significativos de la instalación.

Configuración de funcionamiento.

CONFIGURACIÓN A (Figura C.3 en la página siguiente). Ésta es la configuración usada para estas situaciones:

- Determinar el coeficiente de descarga del diafragma.
- Medir el caudal circulante con el depósito calibrado.

La posición de las válvulas es la siguiente:

- Válvula de membrana: apertura progresiva para controlar el caudal.
- Válvula de esfera 1 (dep. superior): abierta.

- Válvula de esfera 2(dep. inferior): cerrada.

Con esta configuración de las válvulas guiamos el caudal al depósito superior. Usando el desviador de flujo llevamos el agua al depósito calibrado o al de derivación. El estado de los depósitos es:

- Depósito calibrado: aislado del inferior. Se comunican una vez medido el volumen de agua para comenzar una nueva medida.
- Depósito de derivación: está conectado al inferior. El flujo se dirige hacia éste mientras no se realicen medidas volumétricas en el depósito calibrado.

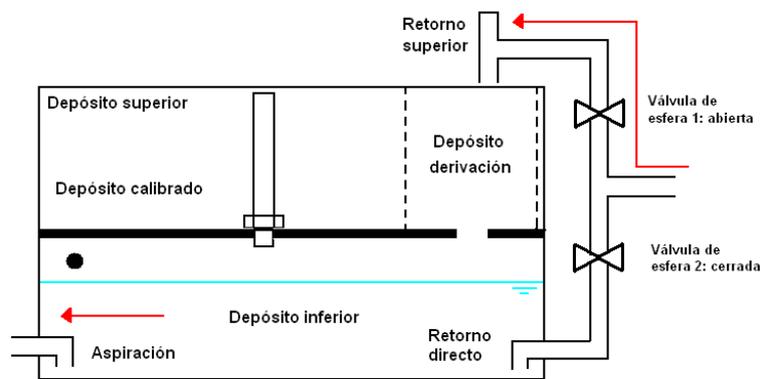


Figura C.3: Configuración A.

Resumen: la bomba aspira del depósito inferior, la impulsa por la instalación hasta el depósito superior donde puede ser guiada al depósito calibrado para la medida de caudal o al depósito de derivación que se conecta con el inferior.

C.4. Metodología de la toma de datos.

Puesta en marcha de la instalación. Antes de comenzar con cualquier ensayo se deberán seguir estas indicaciones:

1. Si el depósito inferior se encuentra vacío, lo llenaremos como mínimo a una altura que cubra por completo la aspiración de la bomba(el nivel máximo deberá estar por debajo de la válvula de vacío).
2. Abrimos completamente las válvulas de retorno al depósito y de impulsión para cebar la bomba. Tras unos segundos cerramos la de impulsión.

3. Ya estamos preparados para la puesta en marcha de la bomba. Una vez presionemos el botón de arranque abrir la válvula de impulsión progresivamente dejando salir las posibles bolsas de aire y estabilizando el flujo.

Es muy importante seguir estos pasos para evitar una avería en la bomba por trabajo en seco. También es aconsejable que si no se va a usar el manómetro diferencial de mercurio cerremos las válvulas que lo conectan a la instalación para evitar que un despiste acabe contaminando el depósito.

Caracterización diafragma.

1. En primer lugar, seguimos las indicaciones del apartado: Puesta en marcha de la instalación. Estas medidas se llevarán a cabo con el tramo recto de tubo de PVC en la posición normal del Venturi, tal y como se muestra en la Figura C.4.

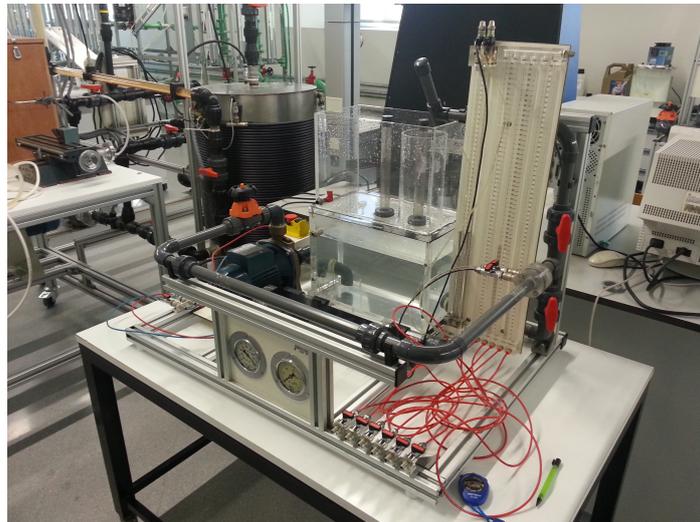
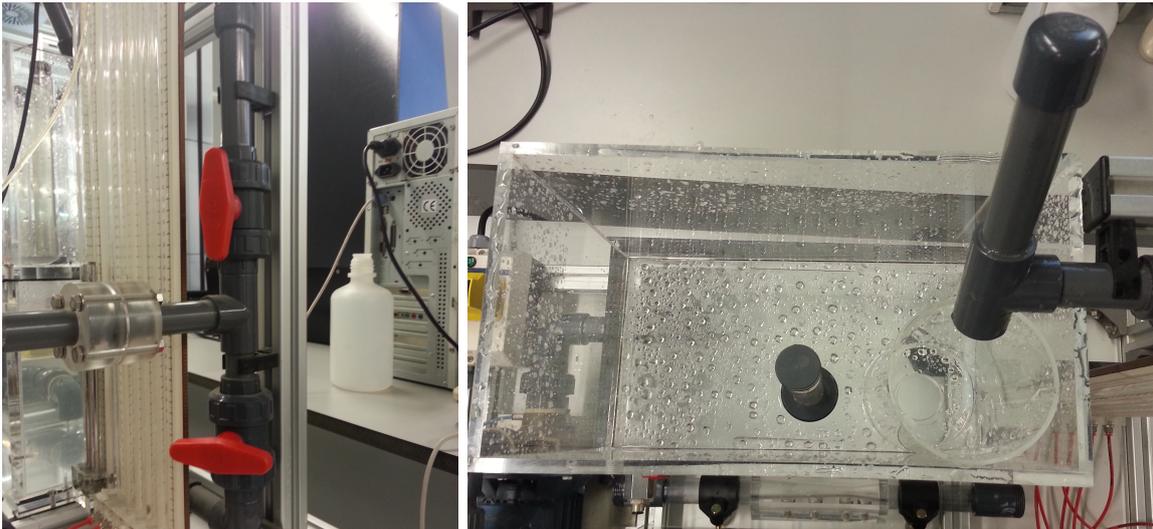


Figura C.4: Instalación con tramo recto de PVC.

2. Conectamos las tomas de presión al manómetro diferencial de mercurio o a los de tipo Bourdon dado que las diferencias de presión en el diafragma, por lo general, son grandes. Si se decide usar el de mercurio, hay que extremar la precaución y variar el caudal lentamente para evitar que un salto de presión excesivo provoque la entrada de mercurio al circuito de agua.
3. Debemos retirar el tapón del depósito de derivación y colocarlo en el depósito calibrado para aislarlo del inferior. Tras esto, guiamos el flujo al depósito de derivación colocando para ello las válvulas de bola y el desviador de flujo como aparece en la Figura C.5 en la página siguiente(Configuración A).



(a) Flujo guiado hacia el depósito superior.

(b) Desviador hacia el depósito de derivación.

Figura C.5: Posición de las válvulas de bola y desviador para el paso 3.

4. Usando la válvula de membrana fijamos un caudal.
5. Tomamos las medidas en los manómetros correspondientes.
6. A la vez que desviamos el flujo al depósito calibrado usando el desviador activamos el cronómetro y esperamos unos segundos hasta llenar un cierto volumen el depósito calibrado. Se debe evitar vaciar el depósito inferior por debajo del nivel de la aspiración para que la bomba no aspire aire. Al mismo tiempo que paramos el cronómetro, redirigimos el caudal al depósito de derivación.
7. Dejamos que el agua se estabilice en el depósito calibrado y tomamos el valor de la altura.
8. Repetimos 4, 5, 6 y 7 hasta llegar a una apertura total de la válvula. Con el manómetro de mercurio no se puede llegar a una apertura total por el motivo comentado anteriormente.

	D. Calibrado			Manómetro de Hg		Reynolds
	Altura(cm)	Tiempo(s)	Q(l/min)	H1	H2	Re_D
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						

Cuadro C.1: Caudales, diferencias de alturas y n^o de Reynolds en el diafragma.

C.5. Análisis y comparación de los resultados.

- Comparar los caudales reales con los obtenidos teóricamente a través de la expresión del caudal corregida con el coeficiente de descarga, C_d , del diafragma.
- Comentar los resultados.

Apéndice D

Guión de prácticas 2: Curva característica de la bomba.

D.1. Objeto de la práctica.

Obtener la curva característica de la bomba para conocer el salto de presión que introduce en la instalación en función del caudal. La ecuación debe tener esta forma, $H_b = a + bQ + cQ^2$.

D.2. Fundamento teórico.

Al igual que para el diafragma, suponemos un flujo ideal y planteamos la ecuación de Bernoulli entre la entrada y la salida de la bomba.

$$p_e + \frac{1}{2}\rho U_e^2 + \rho g h_e + \rho g H_b = p_s + \frac{1}{2}\rho U_s^2 + \rho g h_s \quad (\text{D.1})$$

donde H_b es la altura manométrica adicional que la bomba proporciona al fluido.

Los diámetros de la aspiración e impulsión en nuestra bomba son iguales por lo que podemos simplificar la ecuación anterior eliminando los términos de energía cinética ya que al ser el caudal constante, las velocidades coinciden. Despejamos entonces H_b ,

$$H_b = \frac{p_s - p_e}{\rho g} + (h_s - h_e) \quad (\text{D.2})$$

y analizando el orden de magnitud de cada término ($\frac{p_s - p_e}{\rho g} \sim P_a \gg (h_s - h_e) \sim D$) vemos que la diferencia de cotas en este caso es despreciable quedando la altura

manométrica como la diferencia de presión entre la entrada y la salida.

$$H_b = \frac{p_s - p_e}{\rho g} \quad (\text{D.3})$$

Es muy frecuente que este valor se exprese gráficamente en función del caudal suministrado para cada altura. La experiencia ha demostrado que puede parametrizarse como,

$$H_b = a + bQ + cQ^2 \quad (\text{D.4})$$

donde a, b y c son coeficientes que se determinan experimentalmente.

D.3. Descripción de la instalación.

El equipo va montado sobre un panel horizontal de 600x900mm con cuadro de perfiles de aluminio. Sobre el panel tenemos el depósito, la bomba y la instalación.

El depósito consta de dos compartimentos, uno superior y otro inferior. El superior es utilizado para realizar lecturas volumétricas para la medida del caudal y como separador de aire cuando se realiza el vacío en el depósito inferior. El compartimento inferior es el depósito de aspiración en el que se puede modificar su presión.

El equipo dispone de una bomba que aspira del depósito e impulsa el líquido a través de la instalación, volviendo el mismo al punto de partida, con lo que tenemos un sistema de circuito cerrado. La lectura del caudal se puede realizar tanto de forma volumétrica como con el diafragma existente a la salida de la bomba. Este diafragma tiene un rango de lectura de 800 a 2500 l/h.

Para la demostración del teorema de Bernoulli utilizamos un tubo de Venturi de sección circular a lo largo del cual tenemos una serie de tomas de presión conectadas a un manómetro diferencial de columna de agua. Gracias al estrechamiento inicial y al posterior ensanchamiento del tubo de Venturi, podemos observar como la presión estática disminuye con la sección de paso y aumenta cuando ésta lo vuelve a hacer. Esta disminución de la presión, es medida por un manómetro diferencial de agua que consta de un total de 7 bulbos, 5 de los cuales son para la demostración del Teorema de Bernoulli y los otros 2 para la utilización del diafragma como caudalímetro. Para la regulación del caudal se utiliza una válvula de membrana que permite un ajuste fino del mismo.

En la garganta del Venturi de sección rectangular podemos conseguir una depresión suficiente como para observar el fenómeno de la cavitación. Para una correcta observación del mismo, se ha construido el Venturi de metacrilato. El equipo cuenta además con un manómetro y un vacuómetro con los que podemos medir las sobrepresiones y depresiones producidas. También es posible cambiar las condiciones de

presión en el depósito de aspiración, con lo que tenemos la oportunidad de estudiar el fenómeno para diferentes caudales y presiones.

La siguiente imagen es un esquema de la instalación y de sus puntos más significativos.

LISTADO DE PUNTOS CARACTERÍSTICOS.

- Punto 0: fondo del depósito.
- Punto 1: aspiración de la bomba.
- Punto 2: impulsión de la bomba.
- Punto 3: entrada a la zona convergente del Venturi.
- Punto 4: garganta del Venturi.
- Punto 5: salida de la zona divergente del Venturi.
- Punto 6: aguas arriba del diafragma.
- Punto 7: aguas abajo del diafragma.
- Punto 8a: retorno superior al depósito.
- Punto 8b: retorno inferior al depósito.

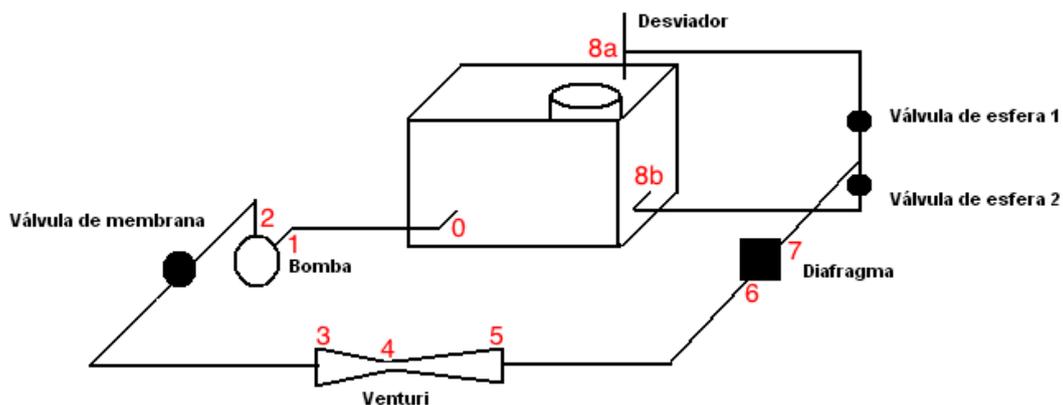


Figura D.1: Puntos más significativos de la instalación.

Configuración de funcionamiento.

CONFIGURACIÓN B(Figura D.2). En cambio, esta configuración se usa para:

- Obtener la curva característica de la bomba.
- Estudiar el fenómeno de la cavitación en el tubo de Venturi.

El estado de las válvulas es el siguiente:

- Válvula de membrana: apertura progresiva para controlar el caudal.
- Válvula de esfera 1(dep. superior): cerrada.
- Válvula de esfera 2(dep. inferior): abierta.

Con esta configuración de las válvulas guiamos el caudal al depósito inferior. Los depósitos están comunicados entre sí lo que permite variar la altura de la columna de agua desde un valor mínimo de 6 cm(necesarios para cubrir la aspiración) hasta un máximo de 0,5 m. Esta altura está determinada por el objetivo del ensayo: si queremos retrasar la cavitación, la altura de agua debe ser máxima y, si por el contrario, el objetivo es adelantarla, la altura debe ser mínima.

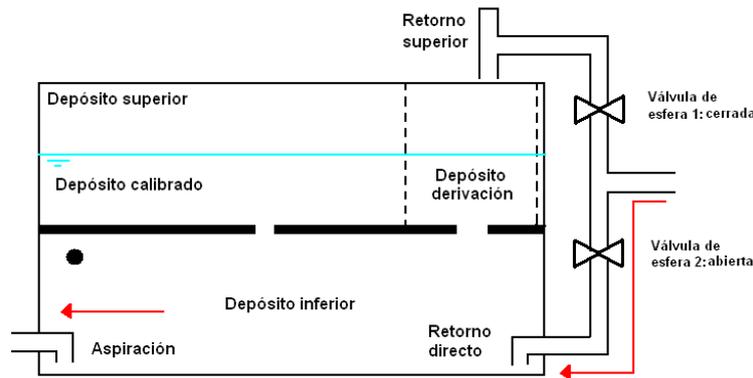


Figura D.2: Configuración B.

Resumen: el caudal aspirado del depósito circula por la instalación hasta el mismo depósito inferior. El caudal circulante se determina mediante la diferencia de presiones en el diafragma.

D.4. Metodología de la toma de datos.

Puesta en marcha de la instalación. Antes de comenzar con cualquier ensayo se deberán seguir estas indicaciones:

1. Si el depósito inferior se encuentra vacío, lo llenaremos como mínimo a una altura que cubra por completo la aspiración de la bomba (el nivel máximo deberá estar por debajo de la válvula de vacío).
2. Abrimos completamente las válvulas de retorno al depósito y de impulsión para cebar la bomba. Tras unos segundos cerramos la de impulsión.
3. Ya estamos preparados para la puesta en marcha de la bomba. Una vez presionemos el botón de arranque abrimos la válvula de impulsión progresivamente dejando salir las posibles bolsas de aire y estabilizando el flujo.

Es muy importante seguir estos pasos para evitar una avería en la bomba por trabajo en seco. También es aconsejable que si no se va a usar el manómetro diferencial de mercurio cerremos las válvulas que lo conectan a la instalación para evitar que un despiste acabe contaminando el depósito.

Curva característica de la bomba.

1. En primer lugar, seguimos las indicaciones del apartado, Puesta en marcha de la instalación. Estas medidas se llevarán a cabo con el tubo de PVC en la posición normal del Venturi al igual que en el caso anterior (Figura 3.20 en la página 44).
2. Conectamos las tomas de presión de la impulsión y aspiración al manómetro y vacuómetro de tipo Bourdon, respectivamente; las diferencias de presión en la bomba requieren el uso de estos dispositivos por su mayor rango de medida.
3. Guiamos el flujo al depósito inferior (Configuración B).
4. Antes de establecer un caudal, tomamos nota de la altura manométrica que proporciona la bomba para un caudal nulo. Después comenzamos a abrir la válvula de membrana fijando un caudal.
5. Medimos este caudal usando el salto de presión en el diafragma como se ha explicado en la sección anterior.
6. Tomamos las medidas en el manómetro y vacuómetro.
7. Repetimos 4, 5 y 6 hasta llegar a la máxima diferencia de presión que soporta el manómetro de mercurio. Se puede llegar a una apertura total de la válvula desconectando el manómetro de mercurio y midiendo el caudal con el depósito calibrado.

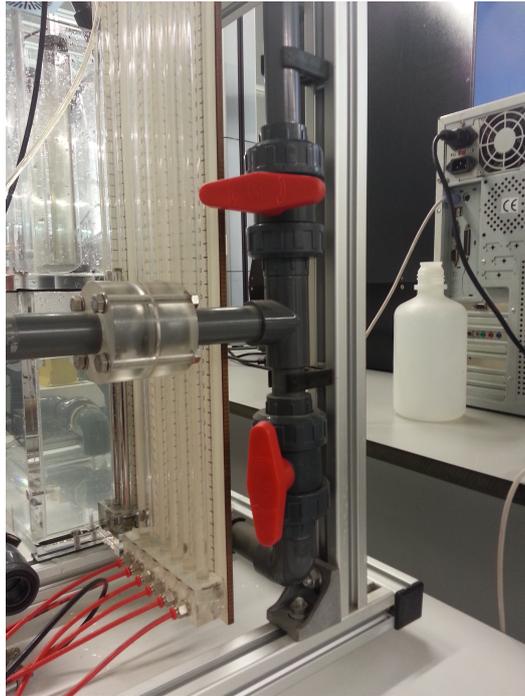


Figura D.3: Flujo guiado al depósito inferior.

	Manómetros tipo Bourdon		Manómetro de Hg	
	Manómetro(<i>m.c.a</i>)	Vacuómetro(<i>cm Hg</i>)	H1(<i>mm Hg</i>)	H2(<i>mm Hg</i>)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				

Cuadro D.1: Datos recogidos de la bomba.

D.5. Análisis y comparación de los resultados.

- Obtener la curva característica de la bomba, ver la bondad del ajuste y buscar la curva de este modelo de bomba en el catálogo comercial.
- Comentar los resultados.

Apéndice E

Guión de prácticas 3: Modelado de la instalación.

E.1. Objeto de la práctica.

Buscar en la bibliografía las constantes de pérdidas localizadas¹ de todos los elementos singulares de la instalación, así como los coeficientes de fricción de cada tramo de tubería para obtener un modelo analítico de distribución de presiones que sea capaz de estimar la presión en cualquier punto de la instalación. Esta práctica se llevará a cabo con el Venturi de sección rectangular, para así poder estimar la presión en la entrada, garganta y salida de éste.

E.2. Fundamento teórico.

En una instalación hidráulica es interesante que fijado un parámetro del sistema (el caudal, presión de descarga,...) podamos estimar el resto de parámetros en los puntos críticos de la instalación. Para ello es necesario plantear las ecuaciones que determinan el comportamiento de cada uno de los elementos de la instalación. Los puntos singulares donde se estimará la presión son los señalados en la siguiente imagen.

Para calcular la presión en un punto determinado usamos la expresión de la bibliografía [15] para tuberías de sección redonda añadiendo un término que representa la pérdida de carga en el estrechamiento y el ensanchamiento, los cuales son de sección rectangular.

¹Se aconseja usar la gráfica adjunta para las pérdidas de carga en la válvula de membrana para un mejor ajuste del modelo. También se adjunta la curva característica de la bomba.

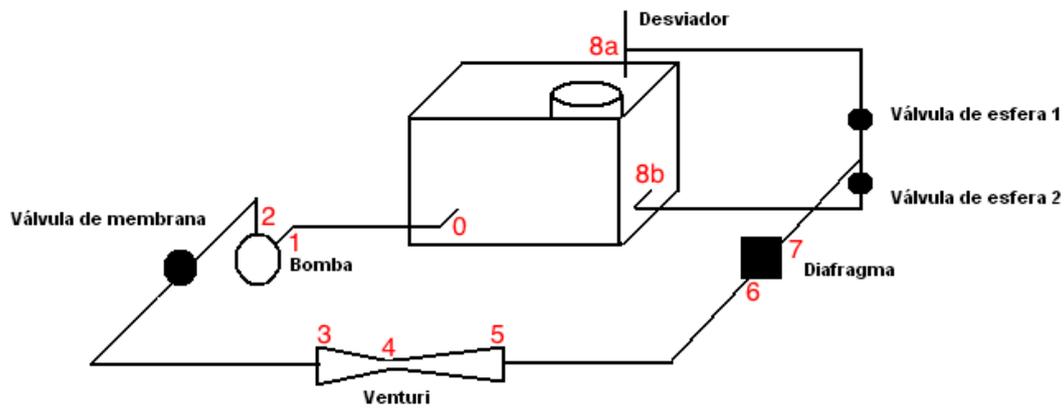


Figura E.1: Puntos de la instalación

$$-g\Delta H = Q^2 \left[\sum_i \frac{8\lambda_i L_i}{\pi^2 D_i^5} + \sum_j \frac{8K_j}{\pi^2 D_j^4} + \sum_n \frac{K_n}{2A^2} \right] - gH_m \quad (E.1)$$

Identificamos los términos de esta expresión,

$g\Delta H$, energía específica en el punto de análisis.

$Q^2 \frac{8\lambda_i L_i}{\pi^2 D_i^5}$, pérdidas de carga en los tramos de tubería.

$Q^2 \frac{8K_j}{\pi^2 D_j^4}$, pérdidas de carga en los elementos de sección circular (codos, válvulas, ...).

$Q^2 \frac{K_n}{2A^2}$, pérdidas de carga en los elementos de sección rectangular (ensanchamiento y estrechamiento).

gH_m , energía específica de la bomba.

INFORMACIÓN ADICIONAL:

Constante de pérdidas de la válvula

La constante de pérdidas de carga en la válvula de membrana en función del nivel de apertura (2 %-25 %) aparece en la siguiente figura.

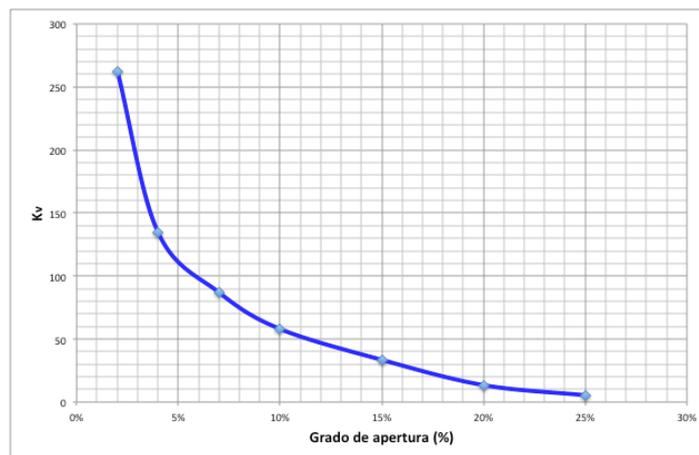


Figura E.2: Correlación entre $K_{válvula}$ y el grado de apertura.

Para valores mayores al 25 % de apertura usamos la siguiente correlación: $K_{válvula}(\%apertura) = -0,0787 \cdot \%apertura + 7,97$.

Curva característica de la bomba

La expresión de la curva viene dada por: $H_b(Q) = 16,706 - 0,0289Q - 0,0008Q^2$.

E.3. Descripción de la instalación.

El equipo va montado sobre un panel horizontal de 600x900mm con cuadro de perfiles de aluminio. Sobre el panel tenemos el depósito, la bomba y la instalación.

El depósito consta de dos compartimentos, uno superior y otro inferior. El superior es utilizado para realizar lecturas volumétricas para la medida del caudal y como separador de aire cuando se realiza el vacío en el depósito inferior. El compartimento inferior es el depósito de aspiración en el que se puede modificar su presión.

El equipo dispone de una bomba que aspira del depósito e impulsa el líquido a través de la instalación, volviendo el mismo al punto de partida, con lo que tenemos un sistema de circuito cerrado. La lectura del caudal se puede realizar tanto de forma volumétrica como con el diafragma existente a la salida de la bomba. Este diafragma tiene un rango de lectura de 800 a 2500 l/h.

Para la demostración del teorema de Bernoulli utilizamos un tubo de Venturi de sección circular a lo largo del cual tenemos una serie de tomas de presión conectadas a un manómetro diferencial de columna de agua. Gracias al estrechamiento inicial y al posterior ensanchamiento del tubo de Venturi, podemos observar como la presión estática disminuye con la sección de paso y aumenta cuando ésta lo vuelve a hacer. Esta disminución de la presión, es medida por un manómetro diferencial de agua que

consta de un total de 7 bulbos, 5 de los cuales son para la demostración del Teorema de Bernoulli y los otros 2 para la utilización del diafragma como caudalímetro. Para la regulación del caudal se utiliza una válvula de membrana que permite un ajuste fino del mismo.

En la garganta del Venturi de sección rectangular podemos conseguir una depresión suficiente como para observar el fenómeno de la cavitación. Para una correcta observación del mismo, se ha construido el Venturi de metacrilato. El equipo cuenta además con un manómetro y un vacuómetro con los que podemos medir las sobrepresiones y depresiones producidas. También es posible cambiar las condiciones de presión en el depósito de aspiración, con lo que tenemos la oportunidad de estudiar el fenómeno para diferentes caudales y presiones.

La siguiente imagen es un esquema de la instalación y de sus puntos más significativos.

LISTADO DE PUNTOS CARACTERÍSTICOS.

- Punto 0: fondo del depósito.
- Punto 1: aspiración de la bomba.
- Punto 2: impulsión de la bomba.
- Punto 3: entrada a la zona convergente del Venturi.
- Punto 4: garganta del Venturi.
- Punto 5: salida de la zona divergente del Venturi.
- Punto 6: aguas arriba del diafragma.
- Punto 7: aguas abajo del diafragma.
- Punto 8a: retorno superior al depósito.
- Punto 8b: retorno inferior al depósito.

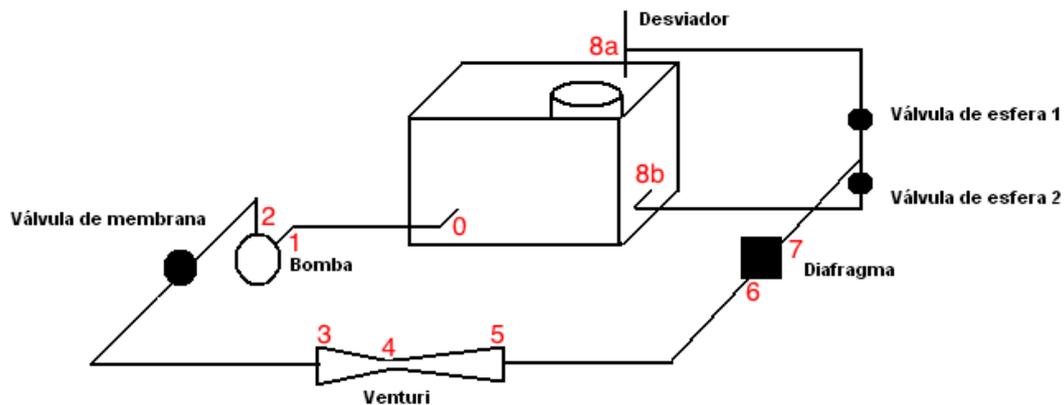


Figura E.3: Puntos más significativos de la instalación.

Configuración de funcionamiento.

CONFIGURACIÓN B(Figura E.4 en la página siguiente). Esta configuración se usa para:

- Obtener la curva característica de la bomba.
- Estudiar el fenómeno de la cavitación en el tubo de Venturi.
- Medir la presión en diferentes puntos de la instalación.

El estado de las válvulas es el siguiente:

- Válvula de membrana: apertura progresiva para controlar el caudal.
- Válvula de esfera 1(dep. superior): cerrada.
- Válvula de esfera 2(dep. inferior): abierta.

Con esta configuración de las válvulas guiamos el caudal al depósito inferior. Los depósitos están comunicados entre sí lo que permite variar la altura de la columna de agua desde un valor mínimo de 6 cm(necesarios para cubrir la aspiración) hasta un máximo de 0,5 m. Esta altura está determinada por el objetivo del ensayo: si queremos retrasar la cavitación, la altura de agua debe ser máxima y, si por el contrario, el objetivo es adelantarla, la altura debe ser mínima.

Resumen: el caudal aspirado del depósito circula por la instalación hasta el mismo depósito inferior. El caudal circulante se determina mediante la diferencia de presiones en el diafragma.

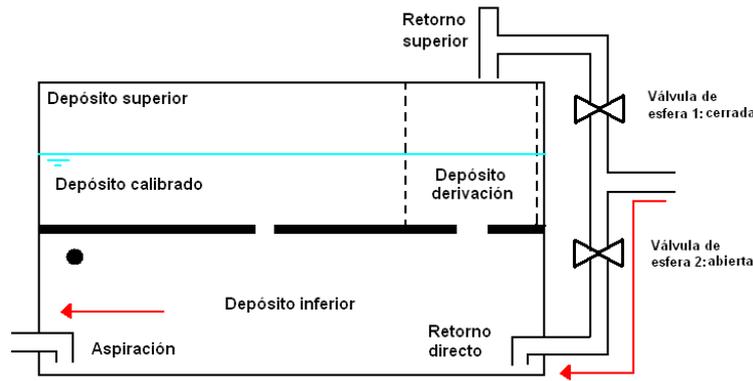


Figura E.4: Configuración B.

E.4. Metodología de la toma de datos.

Puesta en marcha de la instalación. Antes de comenzar con cualquier ensayo se deberán seguir estas indicaciones:

1. Si el depósito inferior se encuentra vacío, lo llenaremos como mínimo a una altura que cubra por completo la aspiración de la bomba (el nivel máximo deberá estar por debajo de la válvula de vacío).
2. Abrimos completamente las válvulas de retorno al depósito y de impulsión para cebar la bomba. Tras unos segundos cerramos la de impulsión.
3. Ya estamos preparados para la puesta en marcha de la bomba. Una vez presionemos el botón de arranque abrir la válvula de impulsión progresivamente dejando salir las posibles bolsas de aire y estabilizando el flujo.

Es muy importante seguir estos pasos para evitar una avería en la bomba por trabajo en seco. También es aconsejable que si no se va a usar el manómetro diferencial de mercurio cerremos las válvulas que lo conectan a la instalación para evitar que un despiste acabe contaminando el depósito.

Lectura de la presión en diferentes puntos de la instalación.

1. En primer lugar, seguimos las indicaciones del apartado, Puesta en marcha de la instalación. Estas medidas se llevarán a cabo con el Venturi de sección rectangular.
2. Colocamos las válvulas para la configuración B.
3. Usando la válvula de membrana fijamos un caudal.

4. Anotamos las alturas del manómetro de Hg conectado al diafragma para poder obtener el caudal experimental. El coeficiente de descarga del diafragma es $C_d = 0,62$.
5. Tomamos las medidas de presión en los puntos significativos de la instalación:
 - a) impulsión y aspiración de la bomba,
 - b) entrada, garganta y salida del Venturi,
 - c) aguas arriba y abajo del diafragma.
6. Repetimos 3 y 4 hasta llegar a una apertura total de la válvula.

TEÓ.	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7	H_{8a}	H_{8b}	$Q(l/min)$
Apertura											

EXP.	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7	H_{8a}	H_{8b}	$Q(l/min)$
Apertura											

Cuadro E.1: Presiones en m.c.a. Teórica y experimental.

E.5. Análisis y comparación de los resultados.

- Comparar las estimaciones del modelo analítico con las presiones y caudales medidos experimentalmente.
- Comentar los resultados.

Apéndice F

Guión de prácticas 4: Detección de la cavitación.

F.1. Objeto de la práctica.

Determinar bajo que condiciones experimentales: nivel de apertura de la válvula, caudal, temperatura,... se manifiesta el fenómeno de la cavitación en la garganta del Venturi de sección rectangular.

F.2. Fundamento teórico.

El principio de Bernoulli afirma que la energía de un fluido se conserva bajo condiciones de flujo ideal. Por tanto, la ecuación de Bernoulli está compuesta por la suma de tres factores, la cual se mantienen constante a lo largo de cada línea de corriente. Estos términos, energía cinética, presión y energía potencial gravitatoria, componen la constante de Bernoulli,

$$\underbrace{\frac{1}{2}\rho U^2}_{\text{Energía cinética}} + \underbrace{P}_{\text{Presión}} + \underbrace{\rho gh}_{\text{Energía potencial gravitatoria}} = cte \quad (\text{F.1})$$

En esta expresión se observa claramente, si suponemos el conducto o Venturi horizontal y, por tanto, sin diferencia de energía potencial entre los puntos considerados, que cuando un fluido es acelerado su presión está obligada a disminuir para conservar la constante, y esto puede llevar a que la presión se reduzca a niveles por debajo de la crítica dando lugar a la vaporización localizada del fluido. Para llegar a esta situación crítica, la instalación dispone de un tubo de Venturi.

Estos tubos son comúnmente usados en varios sectores de la industria y agricultura. Por ejemplo, los carburadores utilizan el efecto Venturi para aspirar el carburante

y mezclarlo con aire; otra aplicación es como medio de adición de abonos al caudal de riego.

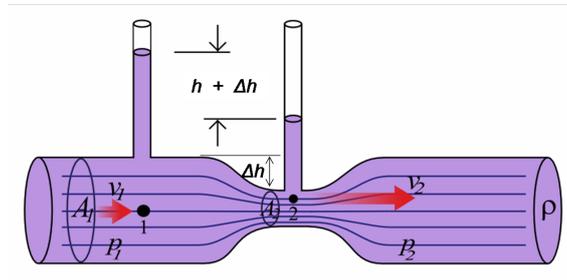


Figura F.1: Salto de presión en la garganta del Venturi.

En la Figura F.1 tenemos un tubo de Venturi en el cual podemos ver la diferencia de presiones entre los puntos 1 y 2; la presión en 2 se reduce a causa del cambio en la sección, y esto, conlleva un aumento en la velocidad del fluido por el motivo que ya hemos comentado. Esta depresión es aprovechada en las aplicaciones citadas anteriormente, y en nuestro caso, será la zona de posible inicio de la cavitación.

F.3. Descripción de la instalación.

El equipo va montado sobre un panel horizontal de 600x900mm con cuadro de perfiles de aluminio. Sobre el panel tenemos el depósito, la bomba y la instalación.

El depósito consta de dos compartimentos, uno superior y otro inferior. El superior es utilizado para realizar lecturas volumétricas para la medida del caudal y como separador de aire cuando se realiza el vacío en el depósito inferior. El compartimento inferior es el depósito de aspiración en el que se puede modificar su presión.

El equipo dispone de una bomba que aspira del depósito e impulsa el líquido a través de la instalación, volviendo el mismo al punto de partida, con lo que tenemos un sistema de circuito cerrado. La lectura del caudal se puede realizar tanto de forma volumétrica como con el diafragma existente a la salida de la bomba. Este diafragma tiene un rango de lectura de 800 a 2500 l/h.

Para la demostración del teorema de Bernoulli utilizamos un tubo de Venturi de sección circular a lo largo del cual tenemos una serie de tomas de presión conectadas a un manómetro diferencial de columna de agua. Gracias al estrechamiento inicial y al posterior ensanchamiento del tubo de Venturi, podemos observar como la presión estática disminuye con la sección de paso y aumenta cuando ésta lo vuelve a hacer. Esta disminución de la presión, es medida por un manómetro diferencial de agua que consta de un total de 7 bulbos, 5 de los cuales son para la demostración del Teorema de Bernoulli y los otros 2 para la utilización del diafragma como caudalímetro. Para la regulación del caudal se utiliza una válvula de membrana que permite un ajuste fino del mismo.

En la garganta del Venturi de sección rectangular podemos conseguir una depresión suficiente como para observar el fenómeno de la cavitación. Para una correcta observación del mismo, se ha construido el Venturi de metacrilato. El equipo cuenta además con un manómetro y un vacuómetro con los que podemos medir las sobrepresiones y depresiones producidas. También es posible cambiar las condiciones de presión en el depósito de aspiración, con lo que tenemos la oportunidad de estudiar el fenómeno para diferentes caudales y presiones.

La siguiente imagen es un esquema de la instalación y de sus puntos más significativos.

LISTADO DE PUNTOS CARACTERÍSTICOS.

- Punto 0: fondo del depósito.
- Punto 1: aspiración de la bomba.
- Punto 2: impulsión de la bomba.
- Punto 3: entrada a la zona convergente del Venturi.
- Punto 4: garganta del Venturi.
- Punto 5: salida de la zona divergente del Venturi.
- Punto 6: aguas arriba del diafragma.
- Punto 7: aguas abajo del diafragma.
- Punto 8a: retorno superior al depósito.
- Punto 8b: retorno inferior al depósito.

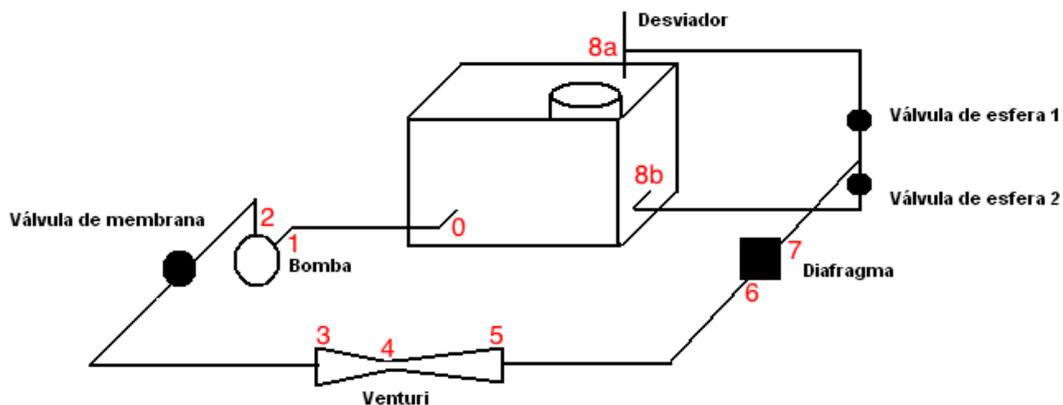


Figura F.2: Puntos más significativos de la instalación.

Configuración de funcionamiento.

CONFIGURACIÓN B(Figura F.3). En cambio, esta configuración se usa para:

- Obtener la curva característica de la bomba.
- Estudiar el fenómeno de la cavitación en el tubo de Venturi.

El estado de las válvulas es el siguiente:

- Válvula de membrana: apertura progresiva para controlar el caudal.
- Válvula de esfera 1(dep. superior): cerrada.
- Válvula de esfera 2(dep. inferior): abierta.

Con esta configuración de las válvulas guiamos el caudal al depósito inferior. Los depósitos están comunicados entre sí lo que permite variar la altura de la columna de agua desde un valor mínimo de 6 cm(necesarios para cubrir la aspiración) hasta un máximo de 0,5 m. Esta altura está determinada por el objetivo del ensayo: si queremos retrasar la cavitación, la altura de agua debe ser máxima y, si por el contrario, el objetivo es adelantarla, la altura debe ser mínima.

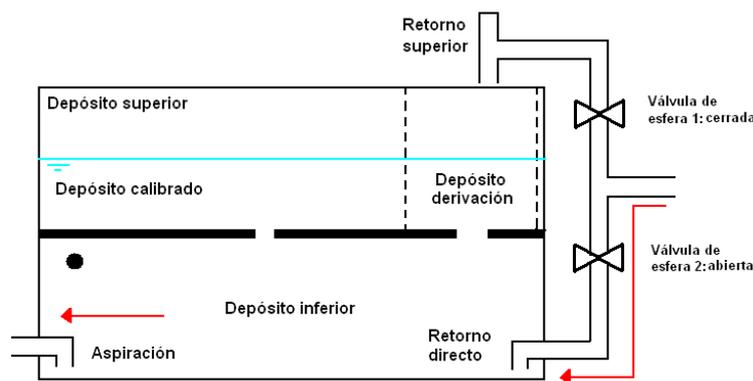


Figura F.3: Configuración B.

Resumen: el caudal aspirado del depósito circula por la instalación hasta el mismo depósito inferior. El caudal circulante se determina mediante la diferencia de presiones en el diafragma.

F.4. Metodología de la toma de datos.

Puesta en marcha de la instalación. Antes de comenzar con cualquier ensayo se deberán seguir estas indicaciones:

1. Si el depósito inferior se encuentra vacío, lo llenaremos como mínimo a una altura que cubra por completo la aspiración de la bomba (el nivel máximo deberá estar por debajo de la válvula de vacío).
2. Abrimos completamente las válvulas de retorno al depósito y de impulsión para cebar la bomba. Tras unos segundos cerramos la de impulsión.
3. Ya estamos preparados para la puesta en marcha de la bomba. Una vez presionemos el botón de arranque abrimos la válvula de impulsión progresivamente dejando salir las posibles bolsas de aire y estabilizando el flujo.

Es muy importante seguir estos pasos para evitar una avería en la bomba por trabajo en seco. También es aconsejable que si no se va a usar el manómetro diferencial de mercurio cerremos las válvulas que lo conectan a la instalación para evitar que un despiste acabe contaminando el depósito.

Cavitación.

1. En primer lugar, seguimos las indicaciones del apartado, Puesta en marcha de la instalación. Estas medidas se llevarán a cabo con el Venturi de sección rectangular.
2. Colocamos las válvulas para la configuración B. Llenamos el depósito a la altura determinada en cada ensayo: mínima, media o máxima.
3. Usando la válvula de membrana fijamos un caudal.
4. Tomamos las medidas en los manómetros correspondientes: las alturas en el manómetro de mercurio nos servirán para conocer el caudal circulante y con el manómetro Bourdon y el vacuómetro tendremos las presiones en los puntos más significativos del Venturi. Las medidas aguas arriba(3) y aguas abajo(5) se toman con el único manómetro Bourdon del que dispone la instalación, por tanto, será necesario intercambiar su posición para cada medida. Se tomará nota de la condición de presión y caudal para la cual la cavitación se manifiesta.
5. Repetimos 3 y 4 hasta llegar a una apertura total de la válvula.

CAUDAL					VENTURI			CAVITACIÓN
Apertura vál.	H1	H2	Q(l/min)	Q(m ³ /s)	P ₃ (mca)	P ₄ (cmHg)	P ₅ (mca)	SI / NO

Cuadro F.1: Datos ensayo de cavitación.

F.5. Análisis y comparación de los resultados.

- Determinar para que apertura y caudal aparece la cavitación en la garganta del Venturi.
- Si se ha realizado la práctica nº3 realizar una predicción con el modelo analítico para el inicio de la cavitación y compararla con lo obtenido experimentalmente en esta práctica.
- Comentar los resultados.

Bibliografía

- [1] *Pedrollo S.P.A*, catálogo 2014 edition. 3.6.2.3
- [2] AM Abdulaziz. Performance and image analysis of a cavitating process in a small type venturi. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 53:40–48, 2014. 5.3.1
- [3] Francesc Boneu Pascual. Estudio y validación de modelos de cavitación en un código de mecánica de fluidos computacional. 2012. 2.2, 2.6, 2.7, 5.3.1, 6
- [4] Christopher E Brennen. *Fundamentals of multiphase flow*. Cambridge University Press, 2005. 2.3, 2.3
- [5] Christopher E Brennen. *Cavitation and bubble dynamics*. Cambridge University Press, 2013. (document), 2.3, 2.7, 2.8, 2.4, 2.5, 2.5, 5.6, 6
- [6] Julián Martínez de la Calle and José González Pérez. *Propulsores marinos*. Universidad de Oviedo, 1997. 2.1
- [7] Manual de la instalación. *Estudio del efecto Venturi, Bernoulli y cavitación FL.6.1*. Material Didáctico y Científico. (document), 5.2, B
- [8] Hojat Ghassemi and Hamidreza Farshi Fasih. Application of small size cavitating venturi as flow controller and flow meter. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22(5):406–412, 2011. 5.3.1
- [9] Hassan Ghasseni and Parviz Ghadimi. Numerical analysis of the high skew propeller of an underwater vehicle. *Journal of Marine Science and Application*, 10(3):289–299, 2011. 2.7.1.3
- [10] ASME International. Measurement of fluid flow using small bore precision orifice meters. Technical report, Standard ASME MFC-14M-2001, 2001. 3.6.1.1, C.2
- [11] Toni Justes Fradera, Alberto Martínez Salguero, et al. Problemas que generan en las hélices: cavitación y averías. 2009. 2.7.1.3
- [12] Yves Lecoffre. *Cavitation: bubble trackers*. Taylor & Francis, 1999. 2.7.2.1

- [13] Janusz Ozonek. *Application of Hydrodynamic Cavitation in Environmental Engineering*. CRC Press, 2012. 2.2
- [14] R Ramírez, M Jácome, A Giraldo, et al. Solución de la ecuación de rayleigh-plesset por medio del método del elemento finito. *Ingeniería y Ciencia*, 9(17), 2013. 2.2
- [15] Antonio Viedma Robles. *Apuntes de Ingeniería de Fluidos*. Universidad Politécnica de Cartagena, 2012. 2, 2.7.1.1, 3.3, 3.3, 3.3, 3.6.1.1, 4.1, C.2, E.2
- [16] Antonio Viedma Robles and Blas Zamora Parra. *Teoría de máquinas hidráulicas*. EDITUM, 1997. 2.7.1.2, 2.7.1.2
- [17] Jeremy Salisbury. Optimizing process speed and efficiency. *World Pumps*, 2011(11):39–41, 2011. 2.7.1.1, 2.7.1.1
- [18] Frank M White. *Fluid mechanics*,(2003). 3.3, 3.6.1.1, C.2
- [19] BORA Yazici, IH Tuncer, and M Ali Ak. Numerical & experimental investigation of flow through a cavitating venturi. In *Recent Advances in Space Technologies, 2007. RAST'07. 3rd International Conference on*, pages 236–241. IEEE, 2007. 2.7.2.1