



E.T.S. de Ingeniería de  
Caminos, Canales y Puertos  
y de Ingeniería de Minas

Estudio paramétrico de  
la bomba de ariete



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena



ET.S. de Ingeniería de  
Caminos, Canales y Puertos y  
de Ingeniería de Minas

Universidad Politécnica  
de Cartagena

TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA CIVIL:

***Estudio paramétrico de la bomba de ariete***

**Autor**

Antonio Iofrío González

**Director**

Dr. D. Sebastián Guillén Ludeña

Cartagena, abril de 2020



E.T.S. de Ingeniería de  
Caminos, Canales y Puertos  
y de Ingeniería de Minas

Estudio paramétrico de  
la bomba de ariete



## Agradecimientos

En primer lugar, a mi tutor en este proyecto. Desde el primer día se involucró notablemente y fue prestándome ayuda en todo lo que necesitaba. Además de hacer más amenas las horas enseñando este proyecto en actividades de difusión de la Escuela, ha soportado incansablemente todas las dudas que le planteaba. Gracias, Sebastián.

Después, nombrar a los compañeros que me he ido encontrando estos años en Cartagena. Dentro y fuera de esta titulación. Por ser capaces de allanar el camino que en ocasiones se había puesto tan cuesta arriba.

Y por supuesto, a mis amigos y a mi familia. Por darme ánimo durante estos años cuando más los necesitaba y por no dejar nunca de creer en mí. Y en especial, a mis padres. No sé me ocurre que podría decirles que les hiciera justicia. Así que simplemente: gracias de corazón.



E.T.S. de Ingeniería de  
Caminos, Canales y Puertos  
y de Ingeniería de Minas

Estudio paramétrico de  
la bomba de ariete

## Resumen

En la Ingeniería Civil, el fenómeno del golpe de ariete es un concepto básico que necesita ser comprendido correctamente antes de diseñar cualquier infraestructura hidráulica. Consiste en un fenómeno transitorio originado por el cierre total o parcial de una válvula al paso de un fluido. Este fenómeno puede provocar la rotura de las tuberías o daños en los grupos de bombas. Es por ello que es esencial poseer un conocimiento exhaustivo del mismo, especialmente en grandes proyectos hidráulicos.

A lo largo del Grado, se nos ha explicado el golpe de ariete en diferentes asignaturas; no solo en el cálculo de la magnitud del mismo, sino también sobre cómo evitarlo o al menos mitigarlo mediante el uso de elementos de protección. Pero siempre, desde la perspectiva de que todos sus efectos son negativos para las infraestructuras hidráulicas.

Sin embargo, en este proyecto se quiere mostrar otra cara, una más positiva en la que se puede utilizar el incremento de presión que provoca el golpe de ariete para bombear agua. Para ello se utilizará una bomba de ariete, capaz de funcionar sin necesidad de electricidad o de combustibles fósiles, que puede ser de utilidad en zonas remotas.

En esto contexto, el proyecto se centrará en:

- Determinar los parámetros que influyen en el funcionamiento de la bomba de ariete.
- Obtener la curva característica H-Q mediante ensayos en el laboratorio.
- Obtener la relación entre el caudal impulsado y el aspirado.
- Caracterizar la eficiencia de la bomba.

Para ello, primero se va a realizar un análisis dimensional. Con ello se busca identificar los parámetros que rigen el funcionamiento de la bomba. Después, se construirá un modelo, en el que se utilizarán tuberías de  $\frac{3}{4}$ " para la aspiración y de  $\frac{1}{2}$ " para la impulsión. La toma de datos se realizará imponiendo unas condiciones de contorno en las que la presión de aspiración será constante mientras que la de impulsión se irá variando. Al final, se obtendrán: la medición de los caudales, mediante el uso de recipientes graduados, y la medición de las presiones con la ayuda de los manómetros.

Los resultados más destacados corresponden a los obtenidos con una ratio 1:5 entre la presión de aspiración y la de impulsión. En estas condiciones, la relación de caudales es del 17.75% y la eficiencia de 70.5 %.



E.T.S. de Ingeniería de  
Caminos, Canales y Puertos  
y de Ingeniería de Minas

Estudio paramétrico de  
la bomba de ariete

## Abstract

In Civil Engineering, the water hammer phenomenon is a basic concept that needs to be well understood before designing any hydraulic infrastructure. It can be defined as a transitory phenomenon caused by total or partial closing of a valve when a fluid passes. This can cause the breakage of pipes and also some damage to pump groups. That is why it is essential to fully understand it, especially in large hydraulic projects.

Throughout the Degree, we have been made aware of this in several subjects; not only in calculating water hammer magnitude, but also in how to avoid it or at least mitigate it through the use of protection elements. But always, from the perspective that all its effects are negative for hydraulic infrastructures.

However, this project seeks to show another face, a more positive one, in which the increase in pressure caused by water hammer can be used to pump water. For this, a ram pump will be used; capable of operating without need for electricity or fossil fuels, which can be useful in remote areas. In this context, project will be focused on:

- To determine parameters that influence the operation of the ram pump.
- To obtain H-Q characteristic curve of a prototype by laboratory tests.
- To obtain the pumped to drive flow ratio.
- To characterize pump efficiency

For those purposes, first a dimensional analysis will be applied seeking to know which parameters will define pump's performance. Then, a ram pump's model will be built, using  $\frac{3}{4}$ " pipes for the drive lane and  $\frac{1}{2}$ " pipes for the pumped flow lane. Measurements will be made on this model under the conditions of fixed suction pressure and variable delivery pressure. At the end, it will be obtained: flow data through the use of graduated vessels and pressures data with the help of manometers.

The results highlight those obtained for the simulation of a 1:5 ratio between suction pressure and delivery pressure. Under these conditions, the flow ratio is 17.75% and the efficiency 70.5%.



E.T.S. de Ingeniería de  
Caminos, Canales y Puertos  
y de Ingeniería de Minas

Estudio paramétrico de  
la bomba de ariete



# Índice

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>3</b>
2.1	Golpe de ariete .....	3
2.1.1	Celeridad de onda .....	5
2.1.2	Tiempo de cierre o de parada. Cierre rápido y cierre lento .....	6
2.1.3	Elementos de protección .....	8
2.2	Bomba de ariete .....	9
2.2.1	Introducción.....	9
2.2.2	Funcionamiento de la bomba .....	9
2.2.3	Análisis de la bomba .....	13
2.2.4	Valores teóricos .....	17
<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>21</b>
3.1	Análisis dimensional .....	21
3.2	Montaje del prototipo .....	23
3.2.1	Primera etapa de la construcción .....	25
3.2.2	Modificaciones.....	29
3.2.3	Segunda etapa de la construcción .....	31
3.3	Experimentos de laboratorio.....	32
3.3.1	Plan de experimentos .....	32
3.3.2	Descripción de la metodología .....	33
<b>4</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>39</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES .....</b>	<b>43</b>
<b>6</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>45</b>



E.T.S. de Ingeniería de  
Caminos, Canales y Puertos  
y de Ingeniería de Minas

Estudio paramétrico de  
la bomba de ariete

## Listado de figuras

2.1	Golpe de ariete .....	4
2.2	Cierre rápido en instalaciones a gravedad .....	7
2.3	Cierre lento en instalaciones a gravedad .....	7
2.4	Válvula de alivio .....	8
2.5	Calderín.....	8
2.6	Esquema general de la instalación de una bomba de ariete .....	10
2.7	Esquema de la bomba de ariete .....	10
2.8	Funcionamiento de la bomba I.....	11
2.9	Funcionamiento de la bomba II.....	12
2.10	Funcionamiento de la bomba III.....	12
2.11	Funcionamiento de la bomba IV .....	13
2.12	Funcionamiento de la bomba V .....	13
2.13	Curva característica de una bomba de 2" .....	19
3.1	Esquema inicial del modelo .....	24
3.2	Esquema final del modelo .....	24
3.3	Bomba de ariete de PVC I.....	25
3.4	Bomba de ariete de PVC II.....	26
3.5	Bomba de ariete de PVC III.....	26
3.6	Evento de divulgación con ambas bombas de ariete.....	26
3.7	Depósito inicial de aspiración.....	27
3.8	Piezas del modelo inicial I (Cuerpo de la bomba) .....	28
3.9	Piezas del modelo inicial II (Calderín).....	28
3.10	Piezas del modelo inicial III (Válvula de ariete) .....	28
3.11	Válvula de pie de pozo.....	29
3.12	Válvula de ariete con tornillo .....	29
3.13	Válvula antirretorno modificada .....	30
3.14	Instalación final de la bomba de ariete .....	31



3.15	Tramo de enlace entre la espiral y la bomba .....	32
3.16	Elementos para ajustar la presión de aspiración .....	34
3.17	Ajuste en la presión del calderín .....	35
3.18	Válvula de ariete cerrada.....	36
3.19	Válvula de ariete abierta ( $Q_t$ ) .....	36
3.20	Muelles para la válvula de ariete.....	37
3.21	Recipientes graduados .....	38
3.22	Medición de los caudales .....	38
4.1	Leyenda de los datos empíricos .....	39
4.2	Curva característica para $H = 0.5\text{bar}$ .....	40
4.3	Comparación de $Q_p/Q_t$ .....	41
4.4	Comparación de eficiencias.....	42



## Listado de tablas

2.1	Valores de celeridad para diferentes materiales .....	5
2.2	Longitud mínima y máxima de aspiración del modelo.....	18
2.3	Caudales para una ratio de 1:5 entre H y h.....	18
3.1	Variables de la bomba .....	21
3.2	Forma dimensional de las variables de la bomba .....	21
3.3	Elementos del modelo inicial .....	24
3.4	Elementos del modelo final.....	25
3.5	Datos de presiones fijadas.....	33
4.1	Resumen de los resultados obtenidos .....	39
4.2	Resultados empíricos y resultados teóricos.....	41



E.T.S. de Ingeniería de  
Caminos, Canales y Puertos  
y de Ingeniería de Minas

Estudio paramétrico de  
la bomba de ariete

## 1 INTRODUCCIÓN

El propósito de este proyecto es el análisis de una bomba de ariete para obtener una idea aproximada del rendimiento que cabe esperar de este tipo de bombas, y así concretar si son una alternativa adecuada para aquellas zonas aisladas en las que se pretenda implantar su uso; así como que parámetros son los que gobiernan el funcionamiento de la misma.

La bomba de ariete funciona gracias a la sobrepresión producida por los continuos golpes de ariete que se suceden en la misma. El golpe de ariete es un fenómeno hidráulico que se manifiesta como una variación de presión. Esto se produce por el cierre de una válvula o por la parada de un grupo de bombas. Como consecuencia, una serie de presiones positivas y negativas se concatenan en la conducción, pudiendo provocar graves daños que lleguen incluso a la rotura de la instalación. Por ello, además de protocolos que busquen evitar este fenómeno, las infraestructuras hidráulicas contienen una serie de elementos de protección (tales como calderines, ventosas, chimeneas de equilibrio...) que buscan mitigar los efectos negativos del golpe de ariete. Pero ahí es donde entra en juego el concepto de la bomba de ariete. En ella, se podrá utilizar en nuestro favor ese fenómeno. Aprovechando la sobrepresión generada por el golpe de ariete, y con una relativa sencillez en su funcionamiento, la bomba es capaz de impulsar agua sin necesidad de ninguna fuente de energía externa.

Utilizando la bibliografía (*Smith, 2019*) se quiere realizar primero un contexto histórico de la bomba de ariete. Debemos remontarnos a 1772. En ese año, el inglés John Whitehurst inventó el llamado “motor de pulsación”, un ariete hidráulico, algo primitivo, que se controlaba de manera manual. Realizó su instalación en la ciudad de Oulton, dónde consiguió elevar el agua hasta una altura final de 4,9 m. Se tienen registros acerca de que instaló otro de estos artilugios en Irlanda en 1783, pero al no existir patentes ni detalles muy claros, no ha terminado de considerarse como el padre de la bomba de ariete tal y como la conocemos.

Y de ahí llegamos a la primera bomba de ariete, que fue inventada en 1796 por el francés Joseph Michel Montgolfier. La puso en funcionamiento para conseguir elevar agua en la fábrica de papel que poseía en Voiron. Montgolfier ya era un ingeniero célebre, puesto que era uno de los coinventores del globo aerostático. Para patentarla contó con la ayuda de su amigo Matthew Boulton, quién le consiguió a su nombre una patente británica en 1797. Posteriormente, los hijos de Montgolfier registraron una versión mejorada de la misma en 1816, obteniendo la correspondiente patente británica. Finalmente, fue Josiah Easton en 1820 quien adquiriendo todos los derechos (incluyendo el diseño de Whitehurst).

La empresa de Easton continuó su ascenso durante el S.XIX hasta convertirse en uno de los fabricantes de ingeniería más importantes en el Reino Unido, y siguió así tras ser

heredada por su hijo James. Se especializaron en temas de suministro de agua, drenajes de tierra y de alcantarillado por todo el mundo. Las bombas de ariete se comercializaron durante muchos años, y a pesar de su gran durabilidad, no acabaron de convencer a los granjeros (sus principales compradores) debidos a su alto precio. De ahí empezaron a surgir diferentes ideas para crear bombas de golpe de ariete caseras, en cuyos diseños nos hemos basado a la hora de crear el modelo de este proyecto. Al final, con la llegada a finales de siglo de la electricidad y de los motores de bajo coste, acabo cayendo en desuso debido a su rendimiento sensiblemente inferior al de sus competidoras que funcionaban con una fuente de energía externa.

Utilizando los textos de la bibliografía (Iversen, 1975; Smith, 2019), se realizará un estudio teórico de los resultados esperables. Además, las ecuaciones, tablas y gráficas contenidas en estos textos nos servirán de referencia para la construcción del modelo, así como para comparar los resultados empíricos obtenidos con los esperables.

La motivación de este proyecto es el estudio científico del funcionamiento de la bomba de ariete. Para ello, se realizará un estudio paramétrico de la misma para concretar cuales son aquellos que influyen en el funcionamiento de la bomba. Posteriormente, y cumpliendo un plan de experimentos, se buscará la obtención de la curva característica del modelo, el rendimiento derivado de la relación de caudales aspirado e impulsado y la eficiencia de la bomba en función del caudal impulsado y del caudal de la válvula de ariete frente a la relación de presiones de la aspiración y la impulsión.



## 2 ESTADO DEL ARTE

Como punto de partida del proyecto, se quieren establecer una serie de conceptos teóricos básicos para poder entender el desarrollo del mismo. Dentro de estos, no se incluirá sólo el del propio golpe de ariete, sino que se añadirán conceptos y datos extraídos de la traducción de textos pertenecientes a la bibliografía en los que se enuncian los principios de la bomba de ariete, así como un análisis matemático de las mismas. Con ello se pretende conseguir una visión completa de la información teórica que rodea a este proyecto.

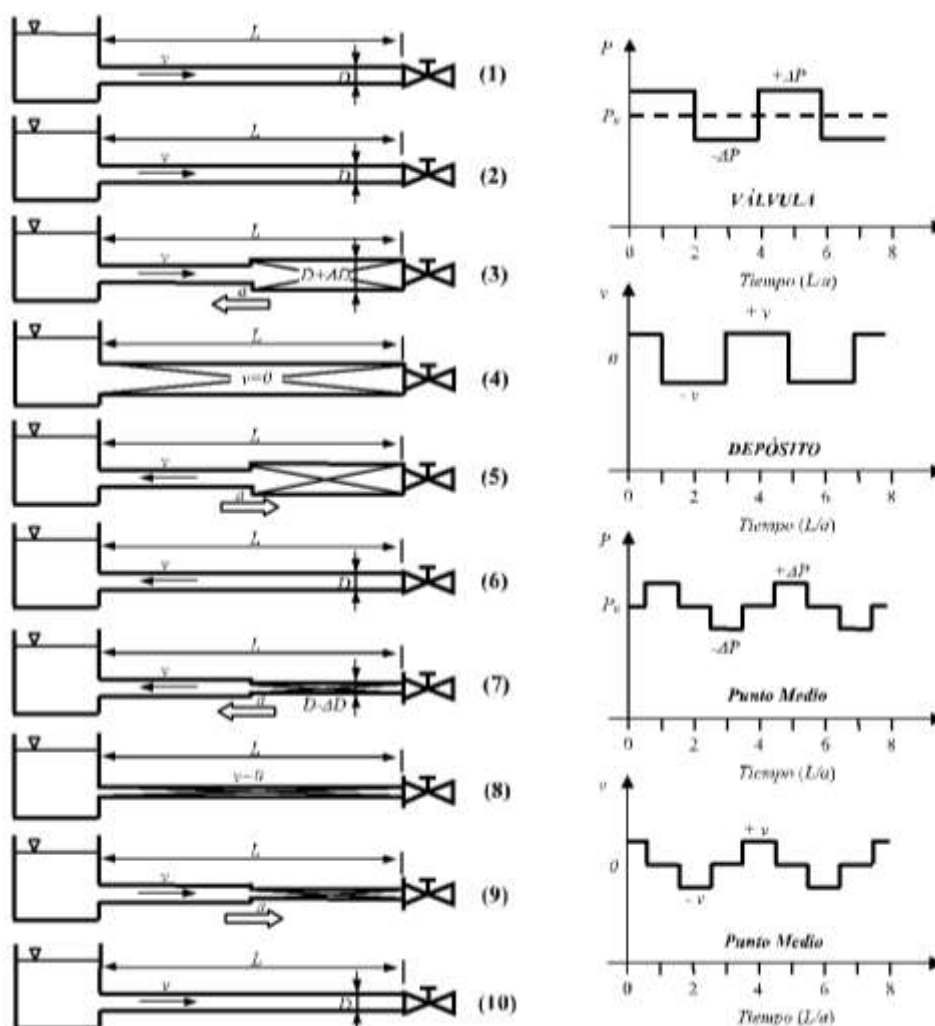
Si bien es cierto que acerca del golpe de ariete existe una cantidad de estudios y bibliografía más que variada, en cuanto a la propia bomba de ariete nos encontramos con que la mayor parte de los estudios son realizados bajo los mismos preceptos que queremos seguir en este proyecto: a partir de unos datos teóricos esperables se realiza la construcción de un modelo sobre el que obtener valores empíricos. Se comenzará este apartado hablando de todo lo relativo al golpe de ariete, para posteriormente centrarse en los estudios relativos a la bomba de ariete.

### 2.1 Golpe de ariete

El golpe de ariete es un fenómeno hidráulico que se manifiesta a través de una variación de la presión, cada vez que la velocidad del fluido es alterada, debida a la manipulación o el fallo de elementos, tales como válvulas y bombas. Este fenómeno se puede producir por el aumento en la demanda de agua por incendio en grifos o hidrantes; al vaciado o llenado de tuberías; en redes de abastecimiento (*Jung et al, 2007*). También se puede producir en impulsiones y aprovechamientos hidroeléctricos por una parada repentina de la bomba o turbina, respectivamente.

Para explicar las distintas fases del golpe de ariete consideramos un esquema simple formado por un depósito elevado aguas arriba, una conducción y una válvula de corte aguas abajo. En el instante inicial, el agua se mueve por la conducción a una velocidad, cuando se le corta el paso de manera total o parcial mediante el uso de una válvula. La parte del fluido que se encontraba más próxima a la válvula se detendrá bruscamente y será comprimida por la que sigue llegando desde atrás. Así, a medida que la velocidad del agua en la tubería disminuye, la presión en la válvula aumenta. Este aumento de presión se va propagando hacia el depósito, en forma de onda, con una velocidad conocida como celeridad de onda. Cuando la onda alcanza el depósito de abastecimiento se disipa, finalizando la primera etapa del golpe de ariete. En esta primera etapa, la energía cinética del agua se transforma en energía de presión. La

siguiente fase se inicia cuando la onda comience a desplazarse en sentido contrario al inicial, es decir, desde la válvula hacia el depósito. En esta fase, la presión en la válvula comienza a disminuir originando una nueva onda de presión que se propaga hacia el depósito, donde se disipa. Así, estas dos ondas se van alternando en la conducción hasta alcanzar de nuevo la presión de equilibrio. Se pueden visualizar estas fases en la *Figura 2.1*. Esta alternancia da lugar a máximos y mínimos de presión que se van atenuando debido a las pérdidas de carga lineales y localizadas. Estos valores máximos y mínimos de presiones pueden provocar la rotura de la tubería bien por sobrepresión o por vacío en el interior.



**Figura 2.1** - Golpe de ariete

A continuación, se hablará de las dos variables más importantes que influyen en el golpe de ariete: la celeridad de la onda de presión y el tiempo de cierre, distinguiendo entre un cierre rápido y un cierre lento. Se incluirá al final una serie de elementos de protección que buscan mitigar los efectos del transitorio sobre el sistema. La información referente a estos sucesivos apartados proviene de textos de la bibliografía (*Castillo Elsitdié, 2018; Ghidaoui et al, 2005*).

### 2.1.1 Celeridad de onda

Como hemos visto con anterioridad, el fenómeno del golpe de ariete tiene su base en la propagación de ondas de presión y depresión por el fluido. Por tanto, será fundamental para entender correctamente el transitorio que conozcamos de manera concreta la velocidad con la que se propagan esas ondas. Esta velocidad se conoce como celeridad.

Se definirá la celeridad ( $a$ ) como la velocidad con la que se propaga una onda de presión a través del fluido que contiene la tubería. Es dependiente de tres factores: las características mecánicas de la conducción, las características geométricas de la misma y la compresibilidad del agua. Allievi propuso una expresión para calcular la celeridad del fluido en el caso de que este fuese agua:

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + G \frac{D}{e}}}$$

Siendo:

$a$  = celeridad ( $m/s$ )

$D$  = diámetro interior (mm)

$e$  = espesor de la tubería (mm)

$G = \frac{10^6}{E}$  dónde  $E$  es el coeficiente elástico del material

En el caso de que la tubería esté formada por una sucesión de tramos con distintas características, la celeridad resultante se establecerá a través de una media ponderada de las diferentes celeridades obtenidas para cada uno de los tramos.

Con iguales características geométricas, la celeridad (en el caso de que el fluido sea agua) sólo variará en función del material que se emplee en la conducción. Para materiales metálicos la velocidad puede ser superior a la del sonido, mientras para materiales plásticos es mucho más lenta. En la *Tabla 2.1* se pueden apreciar estas diferencias.

	<b>G</b>	<b>≈ a (m/s)</b>
<b>Acero</b>	<b>0.5</b>	<b>1110</b>
<b>Fundición</b>	<b>1</b>	<b>1000</b>
<b>Cemento</b>	<b>5/6</b>	<b>800</b>
<b>PVC</b>	<b>20/30</b>	<b>200</b>

**Tabla 2.1** - Valores de celeridad para diferentes materiales

## 2.1.2 Tiempo de cierre o de parada. Cierre rápido y cierre lento

El tiempo que transcurre entre el inicio y el final de la perturbación se conoce como tiempo de cierre en el caso de válvulas, o tiempo de parada en el caso de bombas o turbinas. El tiempo de cierre o parada se puede clasificar como cierre rápido o cierre lento, en función de la relación entre la longitud de la conducción y la longitud crítica. El cierre será rápido si la longitud de la conducción es igual o mayor que la longitud crítica. El cierre será lento si la longitud de la conducción es menor que la longitud crítica. La longitud crítica se define como la longitud recorrida por la onda de presión en la mitad del tiempo de cierre. Se calcula según:

$$L_c = a \frac{T_c}{2}$$

En dónde:

$L_c$  = longitud crítica de la conducción (m)

$a$  = celeridad de onda ( $m/s$ )

$T_c$  = tiempo de cierre (s)

Los valores máximo y mínimo de presión generados por el golpe de ariete dependen en gran medida del tipo de cierre del que se trate. Así, para un cierre rápido se alcanzan los máximos y mínimos absolutos posibles de presión en la conducción, como se refleja en la *Figura 2.2*. Por contra, para un cierre lento la sobrepresión o depresión generada es inferior a la que se produciría con un cierre rápido, siguiendo el esquema de la *Figura 2.3*.

Para un cierre rápido, la sobrepresión generada por el golpe de ariete se calcula mediante la fórmula de Allievi:

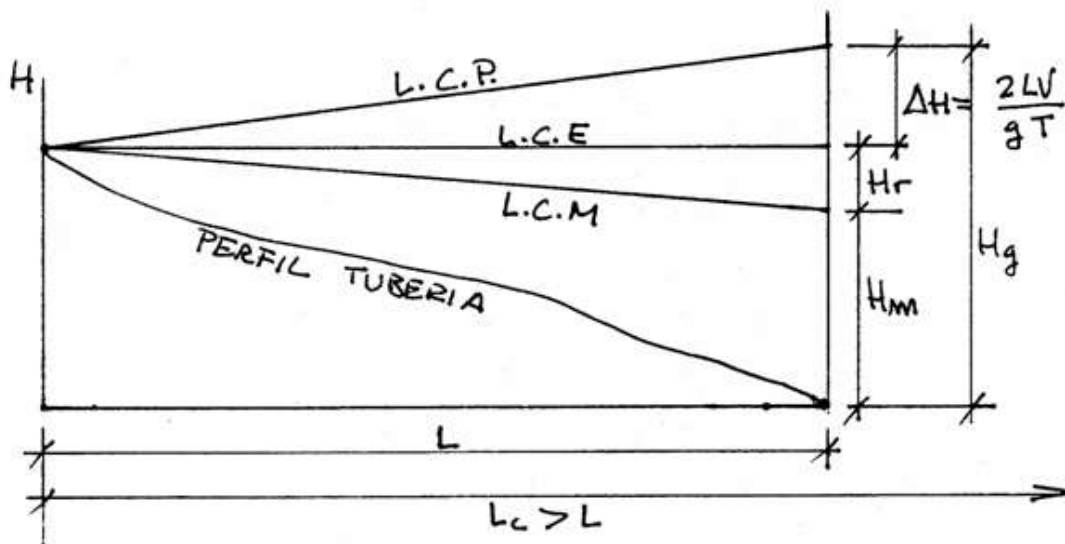
$$\Delta H = \frac{a v}{g}$$



**Figura 2.2** - Cierre rápido en instalaciones a gravedad

Para un cierre lento, debemos utilizar la fórmula establecida por Michaud. Fue enunciada a finales del S. XIX, y supuso una evolución de la formulación del científico coetáneo Jouget. Vendría definida por:

$$\Delta H = \frac{2Lv}{gT}$$

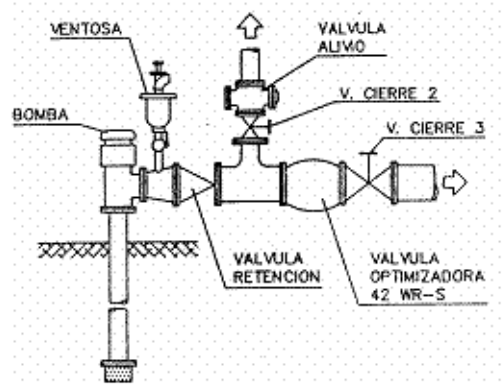


**Figura 2.3** - Cierre lento en instalaciones a gravedad

### 2.1.3 Elementos de protección

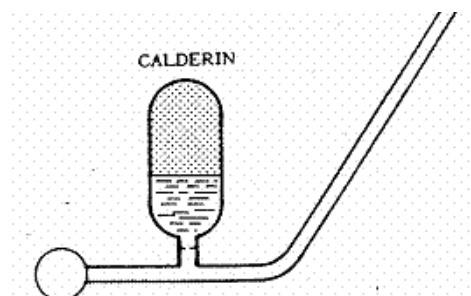
La posibilidad de que se produzcan golpes de ariete condiciona de manera notable el diseño de las instalaciones. Las sobrepresiones que este fenómeno produce obligan a proyectar tuberías con una mayor resistencia (para obtener los puntos de timbraje), lo cual desemboca en que acaban teniendo un mayor coste. Para evitar este inconveniente, en las instalaciones se pueden colocar una serie de elementos para mitigar los efectos de las sobrepresiones. Algunos de ellos serán también incorporados en la construcción de nuestro modelo de bomba de ariete. Ejemplos de estos elementos de protección serían:

- Válvula de seguridad: conocida también como válvula de alivio, su funcionamiento se basa en su apertura automática para dejar salir agua cuando se sobrepasa una presión establecida. De esta manera se busca reducir la sobrepresión, aunque tienen el inconveniente de la correspondiente pérdida de fluido para ello. En la *Figura 2.4* se puede ver el esquema de la misma.



**Figura 2.4 - Válvula de alivio**

- Calderín: es un depósito acoplado directamente a la tubería y que se encuentra cerrado por completo, como se puede apreciar en la *Figura 2.5*. El agua penetra en él cuándo se produce una sobrepresión, perdiendo parte de su energía debido al colchón de aire que hay en el interior del tanque. Es uno de los elementos más empleados en bombes y abastecimientos para mitigar el golpe de ariete.



**Figura 2.5 – Calderín**

- Válvula de retención: es el sistema más expandido en general y también estará presente en nuestro modelo físico. Consiste en situar a lo largo de la tubería una válvula que cuando se detiene el flujo de líquido, se cierra por sí misma, provocando la división de la longitud total de la tubería en tantos tramos como válvulas hayamos colocado. De esta manera se busca la disminución de las sobrepresiones. Su principal inconveniente son las altas pérdidas de carga localizadas que generan, aumentando el coste económico de las impulsiones.

De manera general, comentar que hay otros elementos de protección contra el golpe de ariete que se usan de manera muy habitual. Los más importantes serían las chimeneas de equilibrio, en especial las de gran tamaño para los abastecimientos, y las ventosas, en caso de que se busque controlar el aire que hay en el interior de las tuberías.

## 2.2 Bomba de ariete

### 2.2.1 Introducción

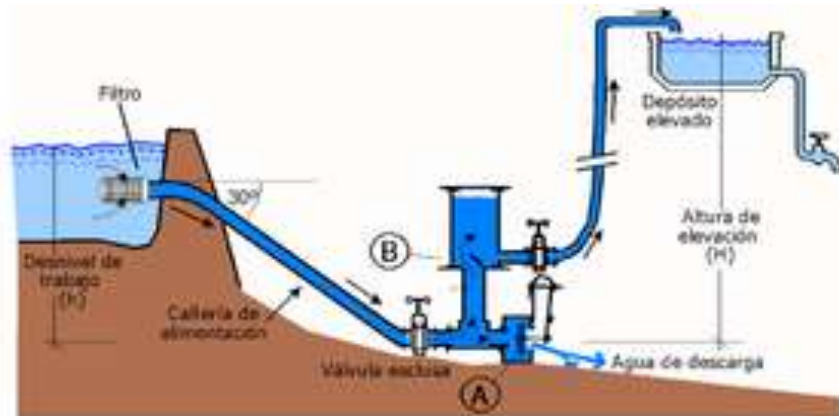
Hasta el momento nos hemos familiarizado con el fenómeno del golpe de ariete, con sus características y sus consecuencias. Y como se ha comentado, su aparición es un gran quebradero de cabeza para los ingenieros y se busca siempre evitar su ocurrencia o al menos disminuir sus efectos. ¿Pero y si pudiéramos aprovechar en nuestro favor esa sobrepresión que se produce? Si fuésemos capaces de controlar de manera adecuada esos ciclos alternativos de ondas de presión y depresión, se podrían utilizar en nuestro beneficio para hacer que pasasen de ser un problema a una oportunidad a nuestro favor. Con este espíritu nació el concepto de la bomba de golpe de ariete, aunque como se ha visto en el apartado 1, no para nada es un concepto que haya surgido recientemente.

La bomba de ariete basa su funcionamiento en el aprovechamiento de la energía cinética de un fluido para elevar parte del mismo a cotas superiores. Su funcionamiento es posible gracias al fenómeno del golpe de ariete. De esta manera, se puede lograr la impulsión sin la utilización de una fuente de energía externa.

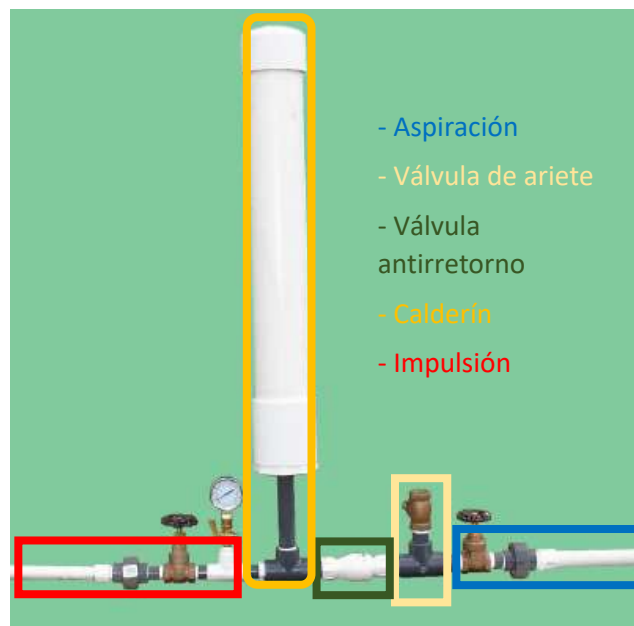
### 2.2.2 Funcionamiento de la bomba

Para describir el funcionamiento de una bomba de ariete, se recurrirá a la utilización de imágenes provenientes de la bibliografía (*Smith, 2019*) sobre las que apoyarse a la hora de explicar las diferentes fases que componen un ciclo de la bomba. Pero antes de ello,

se adjunta un esquema general de la bomba, para así poder enunciar las diferentes partes que la componen y su función. En la *Figura 2.6* se puede apreciar la disposición general de una instalación con una bomba de ariete, en la que tenemos un depósito de aspiración, la propia bomba y un depósito de impulsión. Mientras que en la *Figura 2.7* se puede observar un esquema más detallado de una bomba de ariete, desglosando a grandes rasgos las diferentes partes que la componen; para posteriormente describir la función de cada una de ellas.



**Figura 2.6** - Esquema general de la instalación de una bomba de ariete



**Figura 2.7** - Esquema de la bomba de ariete

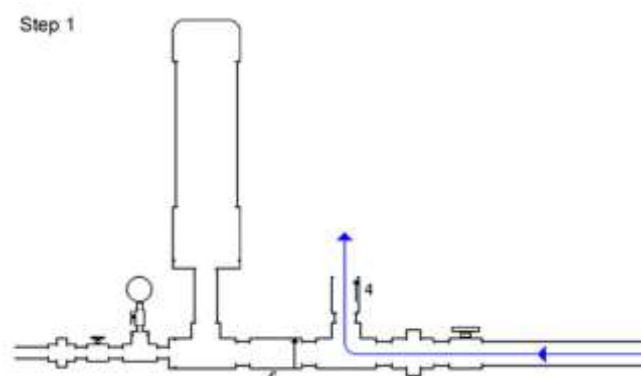
- La aspiración de la bomba provee a la misma de un flujo de agua que debe ser lo más estable en cuanto a su velocidad y su presión. La longitud de la aspiración se debe disponer entre un valor máximo y mínimo (que se indicará en el apartado 2.2.4) en función del diámetro que hayamos escogido para esta tubería.



- La válvula de ariete contiene dentro un muelle que será una de las dos únicas partes con movimiento en la bomba. Es la encargada de generar el golpe de ariete mediante la variación de su posición de abierta a cerrado. A continuación, se verá como esto depende de la velocidad del flujo que discurra por ella.
- La válvula antirretorno es la otra parte mecánica de la que dispone la bomba. Su función es la de permitir el paso del agua de la aspiración a la impulsión en el momento en el que la onda de presión la induce a que permita la circulación del agua.
- El calderín es el encargado de absorber las sobrepresiones generadas por los sucesivos ciclos que vaya realizando la bomba. Un ajuste correcto del mismo es clave para un buen funcionamiento.
- La impulsión es la encargada de la descarga del agua a una cota o presión superior a la de la aspiración. Debe ser de un diámetro inferior al que se haya utilizado en la aspiración.

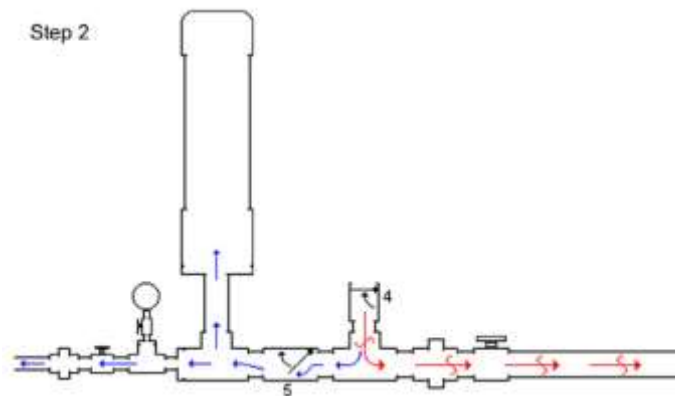
A continuación, se explicará en sucesivos pasos como actúa la bomba de ariete, utilizando para ello una serie de imágenes provenientes de la bibliografía (*Smith, 2019*). Aunque su diseño no es exactamente idéntico al que se va a construir en este proyecto, son completamente análogos en su funcionamiento. De esta manera, para completar un ciclo se sucederán las siguientes fases:

1. En la *Figura 2.8*, el agua (flecha azul) comienza a fluir por la tubería de aspiración y emana por la válvula de ariete (4 en el dibujo), que inicialmente está abierta debido a que el muelle tiene más fuerza que el flujo que le empuja. Esto provoca que el flujo del agua se vaya acelerando cada vez más hasta alcanzar una velocidad suficiente para vencer la resistencia del muelle, provocando así el cierre de la válvula de ariete.



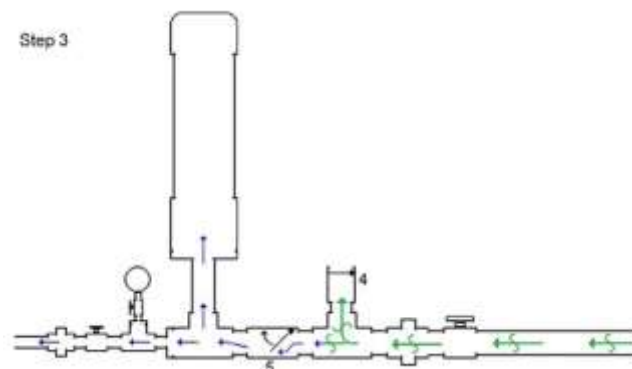
**Figura 2.8** - Funcionamiento de la bomba I

- Se puede ver en la *Figura 2.9* como, con el cierre de la válvula de ariete, se genera un golpe de ariete que produce un incremento de presión en la válvula. Esta se transmite hacia aguas arriba en forma de onda de presión. Parte de esta onda pasa a través de la válvula antirretorno hacia la impulsión, y el resto viaja aguas arriba hacia el depósito de captación (flecha roja), donde la onda se disipa.



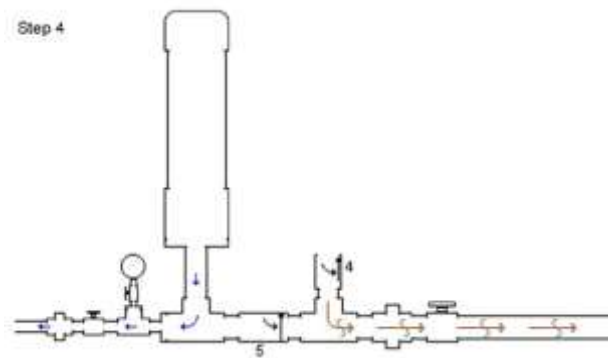
**Figura 2.9** - Funcionamiento de la bomba II

- Una vez se alcanza el máximo de presión en la válvula de ariete, la presión comienza a disminuir en la misma formando una nueva onda de presión decreciente que se propaga hacia aguas arriba por la impulsión. También se puede ver la dirección del flujo (flecha verde). En la *Figura 2.10* se observa todo esto representado.

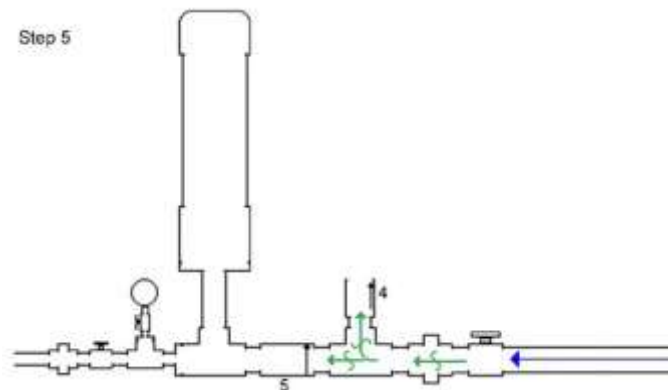


**Figura 2.10** - Funcionamiento de la bomba III

- En el momento en el que la presión que viaja por la tubería de aspiración es inferior a la fuerza que ejerce el muelle, la válvula de ariete vuelve a abrirse y la antirretorno se cierra. El flujo cambiará de dirección (flecha marrón). Así puede verse en las *Figuras 2.11* y *2.12*. De esta manera, se habría completado un ciclo y se iniciaría uno nuevo.



**Figura 2.11** - Funcionamiento de la bomba IV



**Figura 2.12** - Funcionamiento de la bomba V

En el mismo texto bibliográfico, se indica que una bomba de ariete puede describir estos ciclos entre 40 y 90 veces por minuto atendiendo a diferentes factores: la longitud de la tubería de aspiración, la presión en la aspiración o el material con el que esté construida dicha tubería. Se establece que, a mayor duración del ciclo, mayor es el caudal bombeado y mayor es la altura de bombeo. Esto se debe a que, de esta manera, se conseguirá que la velocidad alcanzada por el agua en la aspiración se mayor y, por tanto, dispone de más energía cinética.

### 2.2.3 Análisis de la bomba

Para realizar el análisis de la bomba, se va a recurrir a la información proporcionada por la bibliografía (Iversen, 1975). En ella, aparecen las ecuaciones para el cálculo de la ratio entre los caudales, la eficiencia y el caudal bombeado.

Asumiendo que los efectos de las pequeñas variaciones de presión en el tiempo pueden ser ignorados, la bomba de ariete puede ser analizada considerando únicamente los efectos (dependientes del tiempo) causados por la altura media de aspiración y la de impulsión. Además, tomaremos como el tiempo total de ciclo el que comprende únicamente la suma entre que el flujo de aspiración acelera desde 0 hasta la velocidad en la que consigue cerrar la válvula de ariete y el tiempo en el que la velocidad desciende

hasta el punto en el que se produce el cierre de la válvula antirretorno. Considerando un factor de fricción y un diámetro de aspiración constantes, tendríamos que aplicar un coeficiente de pérdida a la ecuación de conservación de la energía, de tal manera que:

$$\frac{P_i - P_f}{\rho} + z_i - z_f - \frac{f L v^2}{D 2 g} = \frac{L dv}{g dt}$$

Desde el depósito de aspiración a la válvula de ariete se puede hacer una serie de simplificaciones, tales como que la velocidad en el depósito es nula o que, al estar inicialmente abierta, la presión en la válvula de ariete es 0. Además, se podría expresar la velocidad en esa válvula como:  $A_v v_v = A v$ , siendo A y v el área y la velocidad de la tubería de aspiración, comprendida entre el punto de entronque con el depósito y el punto justo anterior a la válvula de ariete. También llamaremos H a la diferencia de cotas entre estos dos puntos. Por último, y teniendo en cuenta los coeficientes de pérdida, podremos definir:

$$M = \left(\frac{A}{A_v}\right)^2 + f \frac{L}{D} + K$$

Sustituyendo se obtendría que:

$$H - M \frac{v^2}{2g} = \frac{L dv}{g dt}$$

Si se vuelven a realizar el mismo procedimiento, pero esta vez desde el punto donde se ubica la válvula de ariete hasta la tubería de impulsión (incluyendo el vaso de expansión del que se disponga), se puede llegar a unas conclusiones muy similares, empezando porque:

$$N = \left(\frac{A}{A_i}\right)^2 + f \frac{L}{D} + K$$

Y si volviéramos a sustituir en la ecuación de continuidad, siendo en este caso h la altura del bombeo, se obtendrá un resultado muy parecido al anterior:

$$h - N \frac{v^2}{2g} = \frac{L dv}{g dt}$$

Estas dos ecuaciones, que están en función del tiempo, van a ser resueltas para dos casos. El primero de ellos, el periodo de tiempo entre que comienza a fluir agua por la válvula de ariete hasta que la velocidad del flujo provoque el cierre de esta. El otro periodo de tiempo para el que se van a resolver es el que se comprende entre ese instante de cierre de la válvula de ariete y el momento de cierre de la válvula antirretorno al final del ciclo. De esta manera, se obtendrá que:

*Tiempo entre la apertura y el cierre de la válvula ariete*

$$\left(\frac{2 L^2}{g H M}\right)^{\frac{1}{2}} \tanh^{-1}\left(\frac{M v_m^2}{2 g H}\right)^{\frac{1}{2}}$$

*Tiempo entre la apertura y el cierre de la válvula antirretorno*

$$\left(\frac{2 L^2}{g h N}\right)^{\frac{1}{2}} \tanh^{-1}\left(\frac{N v_m^2}{2 g H}\right)^{\frac{1}{2}}$$

La suma de ambos dará como resultado la duración de un ciclo. Se puede ver que en ambas ecuaciones se indica un valor  $v_m$ , que corresponde a la máxima velocidad del flujo del agua. Esta ocurrirá en el preciso instante en el que la válvula de ariete se cierre y se abra la antirretorno. Si buscamos calcular el volumen de agua en estos dos instantes, obtendremos unas integrales que enunciaremos de la siguiente manera:

$$\int_0^{v_m} \frac{A v}{g} \frac{L dv}{\left(H - M \frac{v^2}{2g}\right)}$$

$$\int_{v_m}^0 \frac{A v}{g} \frac{L dv}{\left(h - N \frac{v^2}{2g}\right)}$$

Como se puede apreciar, ese punto en el que se produce  $v_m$  es fundamental. A continuación, si se resuelven las integrales anteriores se obtienen los siguientes resultados:

$$\text{Volumen en la válvula de ariete} = \frac{L A}{M} \left[ \log \left( \frac{1}{1 - \frac{M v_m^2}{2 g H}} \right) \right] = (Vol)_t$$

$$\text{Volumen en la válvula antirretorno} = \frac{L A}{N} \left[ \log \left( \frac{N v_m^2}{2 g H} + 1 \right) \right] = (Vol)_p$$

Si la válvula de ariete se mantiene abierta el tiempo suficiente para que se alcance una línea de flujo estable, se puede obtener una velocidad de flujo estable a partir de asumir que:

$$\frac{dv}{dt} = 0 \quad V_s^2 = \frac{2 g H}{M}$$

Con todo esto, se puede calcular la ratio de caudales del que se dispone en la bomba. Esto es posible debido a que los volúmenes que se han calculado anteriormente se pueden asumir que son una media sobre el tiempo total de duración de un ciclo y, por tanto:

$$\frac{Q_p}{Q_t} = \frac{(Vol)_p}{(Vol)_t}$$

Finalmente, se puede definir el funcionamiento de la bomba de ariete a partir de las tres ecuaciones siguientes:

$$\text{Ratio de caudales} = \frac{Q_p}{Q_t} = \frac{M}{N} \frac{\log\left(\frac{N v_m^2}{2 g H} + 1\right)}{\log\left(\frac{1}{1 - \frac{M v_m^2}{2 g H}}\right)}$$

$$\text{Eficiencia} = e = \frac{Q_p h}{Q_t H} = \frac{h M}{H N} \frac{\log\left(\frac{N v_m^2}{2 g H} + 1\right)}{\log\left(\frac{1}{1 - \frac{M v_m^2}{2 g H}}\right)}$$

$$\begin{aligned} \text{Caudal bombeado} &= \frac{(Vol)_p}{\text{tiempo cierre atirretorno}} = \\ &= \frac{A \log\left(\frac{v_m^2 N H}{v_s^2 M h} + 1\right)}{\left(\frac{2 M}{g h}\right)^{1/2} \left[\left(\frac{N}{M}\right) \tan^{-1}\left(\frac{N H v_m^2}{M h v_s^2}\right) + \left(\frac{h}{H}\right)^{1/2} \tanh^{-1}\left(\frac{v_m}{v_s}\right)\right]} \end{aligned}$$

Estas ecuaciones están definidas principalmente por tres relaciones:  $\frac{v_m}{v_s}$ ,  $\frac{N}{M}$ ,  $\frac{H}{h}$ . Pero atendiendo a las ecuaciones iniciales, se pueden simplificar al decir que la relación entre N y M es prácticamente uno, ya que están definidas casi de la misma manera. Implementando esto, se acabaría por obtener un resultado final de:

$$\text{Ratio de caudales} = \frac{Q_p}{Q_t} = \frac{\log\left(\frac{v_m^2 H}{v_s^2 h} + 1\right)}{\log\left(\frac{1}{1 - \frac{v_m^2}{v_s^2}}\right)}$$

$$\text{Eficiencia} = e = \frac{Q_p h}{Q_t H} = \frac{h}{H} \frac{\log\left(\frac{v_m^2 H}{v_s^2 h} + 1\right)}{\log\left(\frac{1}{1 - \frac{v_m^2}{v_s^2}}\right)}$$

$$\begin{aligned} \text{Caudal bombeado} &= \frac{(\text{Vol})_p}{\text{tiempo cierre atirretorno}} = \frac{Q_p}{A v_s} = \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{h}{H}\right)^{1/2} \frac{\log\left(\frac{v_m^2 H}{v_s^2 h} + 1\right)}{\left[\tan^{-1}\left(\frac{H v_m^2}{h v_s^2}\right)^{1/2} + \left(\frac{h}{H}\right)^{1/2} \tanh^{-1}\left(\frac{v_m}{v_s}\right)\right]} \end{aligned}$$

## 2.2.4 Valores teóricos

De la bibliografía (Smith, 2015) se puede tomar ciertas recomendaciones, como que la mejor instalación posible será en una pendiente uniforme que una el desnivel entre el depósito de aspiración y la propia bomba. Los estudios indican que la inclinación óptima debe ser de 10°. Además, también establece que por norma general la diferencia de altura entre la superficie del agua y la bomba debe ser de al menos 1.5m, aunque preferiblemente se deberá buscar que sea de al menos 2m.

De igual manera, esta publicación nos ayuda a establecer unos valores mínimos y máximos para la longitud de la tubería de aspiración, siguiendo los siguientes criterios:

$$L_{\min} = 150 \times d_{\text{admisión}}$$

$$L_{\max} = 1000 \times d_{\text{admisión}}$$

El modelo que se construirá posteriormente tendrá una tubería de ¾ “ en la aspiración, por lo que su longitud debe encontrarse siempre entre los siguientes valores:

Diámetro de aspiración (")	Longitud mínima (m)	Longitud máxima (m)
¾ "	3.05	18.89

**Tabla 2.2** – Longitud mínima y máxima de aspiración del modelo

Existen soluciones que pueden ser instaladas en caso de que la longitud máxima aconsejable de tubería de aspiración no sea suficiente para alcanzar la fuente de agua. Una de ellas es la instalación de una chimenea de equilibrio a la máxima distancia posible medida desde la bomba de ariete. La chimenea de equilibrio debe tener un diámetro tres veces superior al de la tubería de aspiración (que debe ser la misma antes y después del mismo).

El caudal bombeado dependerá de la ratio entre las presiones de aspiración y de impulsión, así como del diámetro de las tuberías de las mismas. En la bibliografía (Smith, 2015) se puede encontrar una tabla que recoge, para diferentes diámetros, el caudal de aspiración y de impulsión esperable si nos encontrásemos en una situación en la que la ratio entre las presiones fuese de 1:5. Lo más destacable es que las diferentes configuraciones de diámetros tienen una ratio de caudales muy similares, tanto en la situación en la que se esté utilizando el caudal mínimo como en la del caudal máximo. Así pues, se puede obtener que el porcentaje de caudal impulsado frente al total de aspiración varía entre un 13.33% y un 12% para la situación de caudal mínimo. En el caso del caudal máximo, estos porcentajes varían aún menos, situándose entre un 12.5% y un 12%. Esto refuerza el montaje de un modelo pequeño, ya que sus resultados pueden ser extrapolables de manera prácticamente directa a un posible modelo que tuviera unas dimensiones mayores. Se concluye que, para una misma relación de presiones, las dimensiones de los diámetros apenas afectan a la relación de caudales de la bomba.

$D_{aspiración}$ (")	$D_{impulsión}$ (")	$Q_{min}^{aspiración}$ (l/min)	$Q_{min}^{impulsión}$ (l/min)	$Q_{max}^{aspiración}$ (l/min)	$Q_{max}^{impulsión}$ (l/min)
¾ "	½ "	2.83	0.37	7.57	0.94
1 "	½ "	5.67	0.75	22.71	2.83
1 – ¼ "	¾ "	7.57	0.94	37.85	4.54
1 – ½ "	¾ "	9.46	1.13	56.77	6.62
2 "	1 "	11.35	1.43	124.90	15.14
2 – ½ "	1 – ¼ "	45.42	5.67	170.32	20.43
3 "	1 – ½ "	75.70	9.46	283.87	34.06
4 "	2 "	113.55	13.62	567.75	68.13

**Tabla 2.3** – Caudales para una ratio de 1:5 entre H y h

Aunque puedan parecer caudales muy pequeños, es imprescindible no perder de vista la idea para la que están concebidas este tipo de bombas: el bombeo constante en el tiempo para abastecimientos o riegos pequeños. Incluso centrándonos en el caso con



menores diámetros (que de hecho son con los que vamos a construir nuestro modelo posteriormente) y con un caudal mínimo, obtendríamos que en una jornada ininterrumpida:

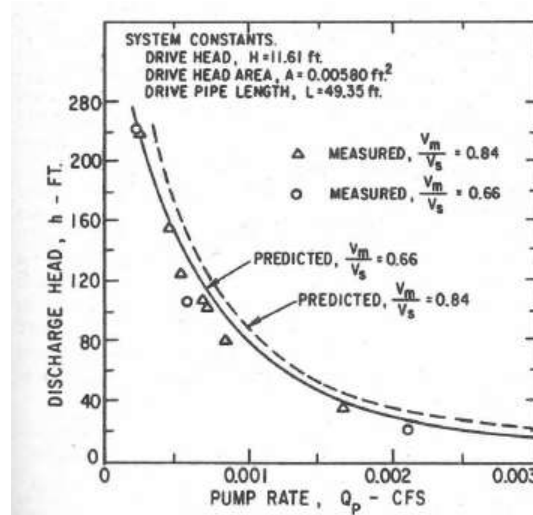
$$\text{Caudal mínimo diario} = 0.37 \times 60 \text{ (mín)} \times 24 \text{ (horas)} = 532.8l$$

Se puede apreciar cómo, a pesar de haber escogido la menor relación de diámetros y el menor caudal posible, se tiene un caudal de agua suficiente como para abastecer una pequeña vivienda. Si nos fuéramos a un valor medio de caudal para una bomba de ariete con 2" y 1" de diámetros respectivamente para la aspiración y la impulsión, se bombearía al día:

$$\text{Caudal diario} = 13 \times 60 \text{ (mín)} \times 24 \text{ (horas)} = 18.720l$$

Con ese caudal diario de agua se podría abastecer una población cercana a los 100 habitantes. Todo ello sin el menor uso de energía, habiendo multiplicado la altura de agua 5 veces y con una relativa sencillez en la construcción. Debemos tener en cuenta que cuánta mayor sea la diferencia de presiones entre la aspiración y la impulsión, menor será el caudal que bombeemos.

En la *Figura 2.13*, se puede apreciar esto último, a través de una gráfica realizada con los valores obtenidos de una bomba de 2" de diámetro de tubería de aspiración. Como nota, hay que reseñar que la *Figura 2.13* proviene de un texto de la bibliografía (*Iversen, 1975*) en el que se utilizan los pies como medida de la altura y pies cúbicos por segundo como unida para el volumen de agua impulsada.



**Figura 2.13** – Curva característica de una bomba de 2"

**Nota:**  $1 \text{ ft} = 0.3048 \text{ m} / 1 \text{ cfs} = 28.32 \text{ l/s}$

Se puede observar cómo disminuye el caudal impulsado ( $Q_p$ ) cuanto mayor es altura ( $h$ ) de impulsión. Proveniente del apartado del análisis de la bomba, se recuerda que el valor  $V_m$  corresponde a la máxima velocidad del flujo del agua (en el instante en el que la válvula de ariete se cierra) y que  $V_s$  corresponde a la velocidad de flujo estable. Se pueden apreciar que los puntos obtenidos de manera experimental se aproximan bastante a las curvas predichas de manera teórica. Los valores de la relación  $V_m/V_s$  indican cómo de cerca estamos de alcanzar la velocidad máxima antes de que cierre la válvula. Por tanto, es un indicador de la duración de los ciclos. En condiciones ideales, la relación  $V_m/V_s$  sería 1, siendo  $V_s$  la velocidad de régimen.

### 3 METODOLOGÍA

#### 3.1 Análisis dimensional

Se va a realizar un análisis dimensional sobre el modelo de la bomba de ariete que se va a construir, con el objetivo de identificar los parámetros adimensionales que influyen en su funcionamiento. Para ello se aplicará el Teorema de  $\Pi$  Buckingham, en el que identificaremos las variables que forman parte de la bomba, así como las dimensiones de estas. Las variables que intervendrían en el modelo de la bomba serían las siguientes:

$L_a$	Longitud de la aspiración	$P_i$	Presión de impulsión
$D_a$	Diámetro de la aspiración	$v_i$	Velocidad de impulsión
$k_a$	Rugosidad de la aspiración	$L_i$	Longitud de la impulsión
E	Espesor de la aspiración	$D_i$	Diámetro de la impulsión
$c$	Celeridad de la onda de la aspiración	$k_i$	Rugosidad de la impulsión
$P_a$	Presión de la aspiración	$T_c$	Tiempo de cierre
$\Delta P_a$	Pérdidas de carga de la aspiración	$\rho$	Densidad del agua
$v_m$	Velocidad máxima del flujo	$\nu$	Viscosidad del agua
$v_s$	Velocidad estable del flujo	$\eta$	Eficiencia

**Tabla 3.1** – Variables de la bomba

De esta manera tendríamos una función que las relaciona tal que:

$$f(L_a, D_a, k_a, e, c, P_a, \Delta P_a, v_m, v_s, P_i, v_i, L_i, D_i, k_i, T_c, \rho, \nu, \eta)$$

A continuación, es necesario que se definan de forma dimensional estas variables que componen la bomba de ariete:

$L_a$	$L$	$P_i$	$ML^{-1}T^{-2}$
$D_a$	$L$	$v_i$	$LT^{-1}$
$k_a$	$L$	$L_i$	$L$
E	$L$	$D_i$	$L$
$c$	$LT^{-1}$	$k_i$	$L$
$P_a$	$ML^{-1}T^{-2}$	$T_c$	$T$
$\Delta P_a$	$ML^{-1}T^{-2}$	$\rho$	$ML^{-3}$
$v_m$	$LT^{-1}$	$\nu$	$L^2T^{-1}$
$v_s$	$LT^{-1}$	$\eta$	—

**Tabla 3.2** – Forma dimensional de las variables de la bomba

Se han seleccionado como variables la densidad del agua ( $\rho$ ) para la masa (M), la longitud de aspiración ( $L_a$ ) para la longitud (L) y el tiempo de cierre ( $T_c$ ) para el tiempo (T). Así pues, aplicando el teorema de  $\Pi$  Buckingham se obtienen los siguientes quince grupos adimensionales:

$$1. \Pi_1 = \frac{D_a}{L_a}$$

$$2. \Pi_2 = \frac{K_a}{D_a}$$

$$3. \Pi_3 = \frac{e}{D_a}$$

$$4. \Pi_4 = \frac{L_i}{L_a}$$

$$5. \Pi_5 = \frac{D_i}{L_i}$$

$$6. \Pi_6 = \frac{K_i}{D_i}$$

$$7. \Pi_7 = \frac{C}{L_a T_c^{-1}}$$

$$8. \Pi_8 = \frac{V_i}{v_a}$$

$$9. \Pi_9 = \frac{V_m}{C}$$

$$10. \Pi_{10} = \frac{V_i}{v_m} \equiv \frac{Q_t}{Q_p}$$

$$11. \Pi_{11} = \frac{\Delta P_a}{\rho v_m^2}$$

$$12. \Pi_{12} = \frac{\Delta P_a}{P_a}$$

$$13. \Pi_{13} = \frac{P_i}{P_a}$$

$$14. \Pi_{14} = \frac{v}{V_m D_a}$$

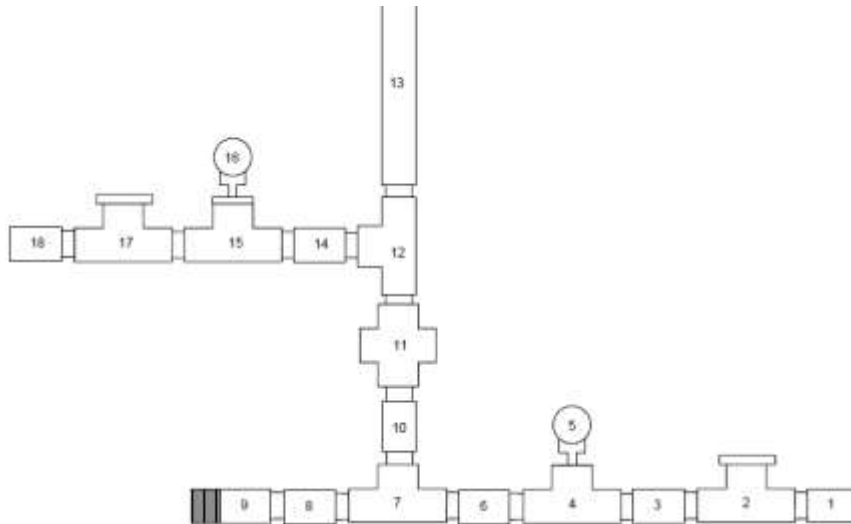
$$15. \Pi_{15} = \frac{Q_p h}{Q_t H}$$

De todos los polinomios obtenidos, en el modelo que se va a construir solo van a variar:  $\frac{Q_p}{Q_t}$ ,  $\frac{P_a}{P_i}$  y  $\eta$ . El resto de polinomios permanecerán invariables. El parámetro objetivo del estudio sería la eficiencia de la bomba, que estará en función de los otros dos polinomios que si pueden variar.

## 3.2 Montaje del prototipo

Las bombas de ariete, construidas de manera artesanal sin recurrir a productos comerciales, disponen de numerosas alternativas a la hora del diseño. La variedad de los mismos radica en que el principio hidráulico que se busca provocar es el mismo en todas, por lo que se escogerá una u otra en función de otras circunstancias. En nuestro caso, parte de esas elecciones personales han venido impuestas por la necesidad posterior de realizar diferentes tomas de datos para crear una curva característica, en lugar de construir una bomba de ariete que fuera a trabajar de forma constante con las mismas condiciones de aspiración y de impulsión. Dado que el objetivo principal de este proyecto es realizar un análisis de la bomba para poder conocer su rendimiento, y tras haberlo comprobado que un mayor tamaño de los diámetros apenas influye en la relación de los resultados obtenidos, se va a optar porque la construcción del modelo se realice en una escala pequeña. Finalmente se escogerá para el modelo a construir un diámetro de  $\frac{3}{4}$ " en la aspiración y de  $\frac{1}{2}$ " en la impulsión.

La construcción de la totalidad del modelo se ha dividido en dos fases. En una primera fase se ha construido el cuerpo de la bomba propiamente dicho, siguiendo el esquema de la Figura 3.1 que se ve a continuación:



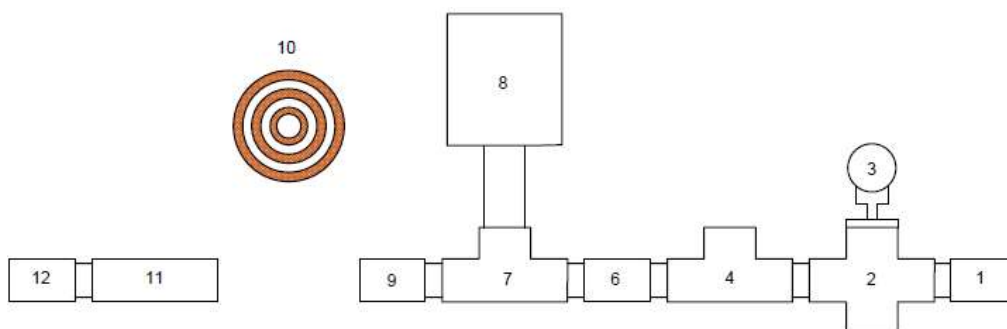
**Figura 3.1** – Esquema inicial del modelo

El desglose de las piezas empleadas sería el siguiente:

1	Tubería de aspiración	10	Unión de $\frac{3}{4}$ "
2	Válvula de $\frac{3}{4}$ "	11	Válvula antirretorno
3	Unión de $\frac{3}{4}$ "	12	T de $\frac{3}{4}$ " a $\frac{1}{2}$ "
4	T de $\frac{3}{4}$ "	13	Calderín
5	Manómetro	14	Unión de $\frac{1}{2}$ "
6	Unión de $\frac{3}{4}$ "	15	T de $\frac{1}{2}$ "
7	T de $\frac{3}{4}$ "	16	Manómetro
8	Unión de $\frac{3}{4}$ "	17	Válvula de $\frac{1}{2}$ "
9	Válvula de ariete	18	Tubería de impulsión

**Tabla 3.3** – Elementos del modelo inicial

La segunda y definitiva fase de construcción tendrá lugar cuando la bomba se instale en el laboratorio para poder llevar a cabo la fase de experimentación. El cuerpo de la bomba se mantendrá igual, y se añadirá al modelo toda la infraestructura necesaria para una aspiración controlada. En la *Figura 3.2* se realiza un esquema de esta distribución.



**Figura 3.2** – Esquema final del modelo

En este caso, el desglose de las nuevas piezas atendería a:

1	Tubería de aspiración	7	T de $\frac{3}{4}$ "
2	Válvula de regulación de caudal	8	Calderín
3	Manómetro	9	Unión de $\frac{3}{4}$ "
4	T de $\frac{3}{4}$ "	10	Espiral de 15 metros
5	Válvula de alivio	11	Unión de $\frac{3}{4}$ "
6	Unión de $\frac{3}{4}$ "	12	Bomba de la <i>Figura 4.7</i>

**Tabla 3.4** – Elementos del modelo final

### 3.2.1 Primera etapa de la construcción

Antes de llegar a la disposición final de todos los elementos que conforman la bomba, para poder realizar sobre la misma el estudio para la obtención de su curva característica, se realiza una primera fase constructiva para ir conociendo si el diseño escogido funciona de manera adecuada. Esto nos permitirá realizar cambios de manera bastante más cómoda de la que podríamos hacerlo en una fase más avanzada del proyecto.

De la misma forma, en esta primera fase, además de la base de la bomba de ariete que más tarde será estudiada, también se va a construir un pequeño modelo de la bomba de ariete construido en PVC sobre el que no se van a realizar ensayos. Se puede apreciar el mismo en las *Figuras 3.3, 3.4 y 3.5*. El motivo es que ambas van a ser utilizadas en talleres de divulgación científica para escolares durante un período de tiempo, como se ve en la *Figura 3.6*. Durante esta fase, la condición de contorno aguas arriba se simula con un depósito elevado, mientras que la condición de contorno de aguas abajo se simula con un calderín hidroneumático al que se le puede variar la presión entre 0.5 y 1 atmósferas.



**Figura 3.3** – Bomba de ariete de PVC I



**Figura 3.4** – Bomba de ariete de PVC II



**Figura 3.5** – Bomba de ariete de PVC III



**Figura 3.6** – Evento de divulgación con ambas bombas de ariete



Estos eventos de divulgación serán utilizados en el proyecto para familiarizarse con el funcionamiento de la bomba, en tareas que van desde la preparación de las condiciones de aspiración hasta la regulación de los ciclos de golpe de ariete, pasando por todas las demás que sean necesarias para un correcto funcionamiento de la bomba. En este caso, la configuración de la aspiración viene dada por un depósito, que se puede visualizar en la *Figura 3.7*, elevado ligeramente a 1.5-2m de altura, unido a la bomba mediante una tubería flexible de unos 5m y de DN 1". Esta longitud se sitúa entre el mínimo recogido en la *Tabla 2.2* y el valor máximo de la misma tabla.



**Figura 3.7** – Depósito inicial de aspiración

Comenzando con el montaje de la bomba que se utilizará para la toma de datos, en primer lugar se van a colocar sobre una superficie todas las piezas que utilizaremos en esta primera fase para poder hacernos una idea del tamaño que va a ocupar. Así pues, tendremos las piezas del cuerpo de la bomba, el calderín y la válvula de ariete, tal y como se puede ver en las *Figuras 3.8*, *3.9* y *3.10*. Dado el carácter "casero" de la construcción de este modelo de bomba de ariete, todas las piezas son fácilmente obtenibles en diferentes superficies comerciales.



**Figura 3.8** – Piezas del modelo inicial I (Cuerpo de la bomba)



**Figura 3.9** - Piezas del modelo inicial II (Calderín)



**Figura 3.10** – Piezas del modelo inicial III (Válvula de ariete)

### 3.2.2 Modificaciones

Antes de continuar, es de suma importancia que queden claras las dos modificaciones necesarias para el correcto funcionamiento de la bomba de ariete. Si bien es cierto que las modificaciones a las piezas son relativamente sencillas, su implantación permite que se produzcan los sucesivos golpes de ariete y que se impulse correctamente el agua a través de la válvula antirretorno. Así pues, antes de proceder al inicio del montaje es necesario realizar dos modificaciones.

En cuanto a la válvula de ariete, siendo verdad que hay disponible en comercios muy especializados unas piezas que pueden ser utilizadas como válvulas de ariete, en este proyecto se va a proceder a crear nuestra propia válvula de este tipo. Para ello se va a utilizar una válvula de pie de pozo, similar a la de la *Figura 3.11*, y una pieza adicional para regular.



**Figura 3.11** – Válvula de pie de pozo

El primer paso será extraer del interior de la válvula de pie de pozo el muelle del que dispone. De esta manera podremos conseguir invertir el funcionamiento de apertura y cierre de la pieza. Posteriormente, se dispone de dos alternativas para esa pieza adicional que se utilizará para regular. Esta pieza puede ser un tornillo, como se ve en la *Figura 3.12*, que haya sido taladrado a través de la válvula y con roscas que se usen para la regulación.



**Figura 3.12** – Válvula de ariete con tornillo

La otra alternativa, que es por la que finalmente se optó en nuestro proyecto, es regular mediante una pequeña chapa metálica que atraviese longitudinalmente la válvula de pie de pozo y que haga de tope para el muelle, tal y como se puede observar en la *Figura 3.10*. Una vez se encuentra colocado este tope máximo, utilizando arandelas se podrá regular la fuerza del muelle de la válvula de ariete. Cuántas más arandelas se coloquen, mayor será la fuerza del mismo para mantenerla abierta y, por tanto, deberá ser mayor la velocidad del flujo para conseguir cerrarla.

La segunda modificación necesaria tendrá que ver con la válvula antirretorno. Aunque el cambio a realizar es bastante sencillo, es posible encontrar ciertas dificultades a la hora de realizarlo. Consiste en sacar el muelle interno, tal y como se muestra en la *Figura 3.13*, que confiere resistencia a esa válvula. Para ello, en nuestro caso tuvimos que acudir al uso de destornilladores y alicates para conseguirlo.



**Figura 3.13** - Válvula antirretorno modificada

Así mismo, una de las adaptaciones que se realizó a lo largo de esta fase fue el cambio de posición de la válvula de ariete. En un primer lugar se barajó que su ubicación fuera en la misma T final en la que se encontraba, pero con una orientación vertical. Tras varias pruebas, se comprobó una mayor dificultad a la hora de regular la bomba, así como que, a la hora de medir el caudal expulsado por la misma en la futura fase de experimentación, esta orientación podría ser problemática. Como se puede apreciar en las *Figuras 3.3, 3.4 y 3.5*, en la bomba construida con PVC también se había optado por la orientación vertical de la válvula de ariete, pero en este caso no se modificó.

Aunque huelgue decirlo, estando frente a un modelo por el que va a circular el agua, es esencial sellar con teflón todas las uniones que haya en el mismo. Antes de cerrar esta etapa, se quiere comentar alguna de las dificultades encontradas en ella. Especialmente estarían centrada en que cualquier cambio de alguna pieza por rotura o sustitución por una mejor implica el desmontaje de gran parte de la bomba y su posterior ensamblaje de nuevo con su correspondiente teflón. Así como que el elemento principal del modelo,

el muelle que acciona la válvula de ariete, puede sufrir con el tiempo desgaste y atascamientos con la válvula de pie de pozo o con la chapa que hace de tope.

### 3.2.3 Segunda etapa de la construcción

En esta etapa se concluirá la construcción del modelo para poder comenzar con la realización de la toma de datos empíricos para la elaboración de la curva característica de la bomba. Partiendo de la base del modelo de la *Figura 3.1*, se le añadirán a la bomba de ariete una serie de accesorios que nos permitirán realizar la fase experimental. Estos añadidos, que se pueden ver en la *Figura 3.2*, estarán centrados en la aspiración. Posteriormente, en el apartado 3.3.2 se describirá el manejo de las válvulas que se han añadido en esta fase.

Con el esquema definitivo del modelo, cuya disposición se puede ver en la *Figura 3.14*, se gana principalmente longitud en la tubería de aspiración, buscando así mayorar el golpe de ariete que se consigue en cada ciclo. En este caso disponemos de una espiral de 15 metros, que junto con los tramos de unión nos dará una longitud total de 16 metros. Esta longitud se debe contar a partir de la ubicación del vaso de expansión, que es quién recoge junto con la válvula de alivio las ondas de sobrepresión provocadas por la válvula de ariete. Este valor es inferior al máximo recomendado en la *Tabla 2.2* de 18.89 metros para un diámetro de aspiración de  $\frac{3}{4}$ ''.



**Figura 3.14** – Instalación final de la bomba de ariete

Dado que no se dispone del espacio necesario para tener una longitud de aspiración suficientemente grande sin tener que recurrir a una espiral, se requiere de la colocación de un tramo de tubería recto, de aproximadamente medio metro, tal y como se ve en la *Figura 3.15*. Con ello se busca conseguir una mejor entrada del flujo del agua al cuerpo principal de la bomba.



**Figura 3.15** - Tramo de enlace entre la espiral y la bomba

### 3.3 Experimentos de laboratorio

#### 3.3.1 Plan de experimentos

En la fase experimental del proyecto, se llevarán a cabo una serie de mediciones con el objetivo de poder crear la curva característica de la bomba y compararla después con los valores esperables que vengan recogido de la teoría. Partiendo del esquema anterior con el que se ha finalizado la última etapa de construcción del modelo, se prepararán las condiciones iniciales pertinentes bajo las que se van a desarrollar las distintas medidas empíricas.

El objetivo fundamental que se busca en esta fase es conocer los volúmenes de fluido aspirado e impulsado para las diferentes de alturas que vayamos imponiendo. De hecho, más allá de conocer el valor numérico de esos datos, lo que realmente será de gran interés es conocer qué porcentaje del caudal total de aspiración representa el que se ha logrado impulsar. Es decir, que porcentaje de flujo inicial tenemos que emplear como “energía” (el que emerge por la válvula de ariete) para conseguir alcanzar la presión final que se busque en cada caso.

El plan de experimentos consta de siete ensayos. En ellos, la presión de aspiración se ha mantenido constante a 0.5 bares, mientras que la presión de impulsión es la que se irá modificando para los sucesivos ensayos. Los manómetros colocados en la bomba, tanto cerca de su aspiración como cerca de la impulsión, nos aportarán las medidas de  $h$  (aspiración) y  $H$  (impulsión). Por otro lado, el caudal lo obtendremos de los recipientes graduados de los que disponemos. Las condiciones de presión fijadas serían:

	<b>h</b>	<b>H</b>
<b>1</b>	<b>2.00</b>	<b>0.50</b>
<b>2</b>	<b>2.50</b>	<b>0.50</b>
<b>3</b>	<b>3.00</b>	<b>0.50</b>
<b>4</b>	<b>3.50</b>	<b>0.50</b>
<b>5</b>	<b>4.00</b>	<b>0.50</b>
<b>6</b>	<b>5.00</b>	<b>0.50</b>
<b>7</b>	<b>6.00</b>	<b>0.50</b>
	<i>bar</i>	

**Tabla 3.5** – Datos de presiones fijadas

### 3.3.2 Descripción de la metodología

El desarrollo de los experimentos busca la obtención de datos empíricos con los que conformar una curva característica de la bomba para compararla con datos teóricos esperables. Si bien el procedimiento que se va a llevar a cabo es sencillo, en cuanto a los cambios a realizar para ir obteniendo los diferentes datos, la dificultad de esta experimentación radica en la concreción de los pequeños ajustes a realizar. Dado que se busca el mayor rendimiento posible de la bomba, cualquier mínimo desajuste conllevará una desvirtuación de los datos que se obtengan e incluso la detención de la propia bomba.

Con ello se quiere dar valor al papel que juega cada una de las piezas ajustables de la bomba. Por el lado más cercano a la aspiración, se dispone de una válvula reguladora de caudal y una válvula de alivio, como se puede ver en la *Figura 3.16*. La primera se maneja mediante una llave Allen que utilizaremos para ajustar el caudal que deja circular. Por su parte, la válvula de alivio se puede regular mediante el tornillo del que dispone, aumentando o disminuyendo la presión a partir de la cuál entrará en funcionamiento. Se recuerda que su función es la de ser una salida de agua “de emergencia” en caso de que el golpe de ariete provoque una sobrepresión que no sea capaz de asumir el calderín de la aspiración. Este calderín será clave a la hora de fijar la presión constante a la que

queremos realizar los experimentos, ya que debe tararse a esa presión de 0.5 bares para forzar que se mantenga en ese valor constante que se busca para la aspiración.



**Figura 3.16** – Elementos para ajustar la presión de aspiración

La selección de ese valor de 0.5 bares para la aspiración es debido a que después de varias pruebas, ha resultado ser el más estable para poder realizarse los diferentes ensayos. En nuestro caso, no se dispone de un depósito de agua que se encuentre a cinco metros de altura, sino que se utilizará una toma de agua de la red a la que se le reducirá la presión y el caudal mediante los elementos que se han enunciado anteriormente y que aparecen en la *Figura 3.16*. En el caso de qué si se dispusiera de un depósito con un aporte de agua continuo a la misma presión, no serían necesarias las dos válvulas que se ubican en esta zona, y sólo contaríamos con el calderín regulado a la presión de ese depósito para que cumpliera correctamente su función de evitar sobrepresiones en el sistema.

Una vez se tienen todas las condiciones establecidas correctamente, se puede proceder a realizar la toma de datos pertinentes. La metodología empleada para realizar una medición constará de los siguientes pasos:



- ❖ En primer lugar, se abrirá el grifo que aportará flujo de agua desde la red de la que se dispone en el laboratorio. Este flujo, mediante el empleo de una manguera, llegará a donde realmente comienza la bomba: los elementos de regulación de la *Figura 3.16*.
- ❖ En este punto es el que se debe configurar la aspiración de la bomba de tal manera que posea una presión de 0.5 bares de forma constante. Para ello, regularemos la válvula de caudal con la ayuda de una llave Allen. Mientras que la válvula de alivio la regularemos mediante el tornillo que dispone. Además, se ha de regular el calderín ubicado en esta zona a 0.5 bares.
- ❖ En primer lugar, con la válvula de ariete abierta, dejaremos que el total del agua emerja por ella. En este momento realizaremos los ajustes necesarios en las válvulas de la aspiración para asegurarnos que el manómetro indique la presión adecuada. El ajuste es algo complicado, ya que hay que ajustar a la vez dos válvulas que afectan a la presión con poco recorrido que variemos en ellas. Una vez se ha conseguido tener una presión de 0.5 bar estable mientras el agua fluye a través de la válvula de ariete, se puede dar por finalizado este paso.
- ❖ Nos centramos ahora en la impulsión. Con la válvula de la impulsión cerrada por completo, comenzaremos ajustando, como se puede observar en la *Figura 3.17*, el calderín que se encuentra aquí a la presión objetivo en cada una de las mediciones.



**Figura 3.17** – Ajuste en la presión del calderín

- ❖ Se comenzará en este punto a regular la válvula de ariete, ajustando ligeramente la fuerza del muelle hasta que se logre el comienzo de los ciclos. Esto es el punto central del funcionamiento de la bomba. El muelle debe de ser lo suficientemente fuerte para poder volver a abrir la válvula cuando la presión del agua la haya cerrado, como en la *Figura 3.18*, pero no tanto como para que el flujo no sea capaz nunca de lograr la situación de apertura que se observa en la *Figura 3.19*.



**Figura 3.18** – Válvula de ariete cerrada



**Figura 3.19** – Válvula de ariete abierta ( $Q_t$ )

- ❖ Para regular la válvula, se van a emplear dos métodos principalmente: uno inicial más grosso modo y otro en segunda instancia que sea más preciso. El primero de ellos consiste la colocación de un número de arandelas (que dependerá de la presión de aspiración) con el muelle para conferirle más o menos recorrido en su elongación y así variar la fuerza que ejerce, tal y como se aprecia en la *Figura 3.20*. Además, colocando una arandela entre la válvula y el muelle, conseguiremos evitar problemas de obstrucción y mejoraremos la superficie de contacto. El segundo ajuste se producirá gracias a la propia unión roscada que la válvula de pie de pozo que hemos modificado. Este será el ajuste fino que habrá que realizar, buscando que los ciclos

sean los más largos posible. Si bien es cierto que no hay mucho recorrido válido para ello, por lo que habrá que llevar cuidado a la hora de realizar los movimientos.



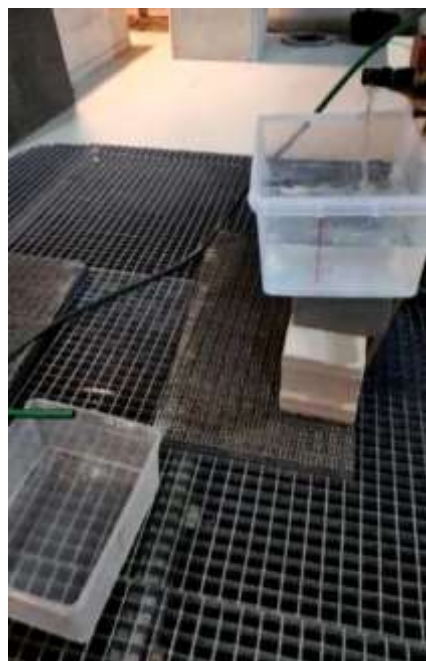
**Figura 3.20** – Muelles para la válvula de ariete

- ❖ El momento de inicio de los ciclos es el más crítico del experimento. Por un lado, se debe lograr unos ciclos constantes y lo más largos posibles. En la búsqueda de ello, se puede provocar la parada de la bomba, por lo que se deberá volver a iniciar el proceso desde el punto de partida de la válvula completamente abierta. Por otro lado, se debe vigilar el ajuste de los elementos de la aspiración, pues pueden haber sufrido alguna pequeña variación que se deberá subsanar con reajuste de las válvulas.
- ❖ Una vez los ciclos sean estables, y tanto la aspiración como la impulsión estén correctamente fijada en su presión, se comenzará a manejar la válvula que abre la impulsión. Para lograr simular de manera correcta la presión de impulsión que se ha fijado, debemos abrir poco a poco esta válvula hasta que logremos alcanzar un punto en el que, tras cada variación provocada por el golpe de ariete, el manómetro vuelva a marcar la presión que se ha establecido con el calderín. Es decir, que el flujo de agua que se impulsa no sea ni superior ni inferior al que entra en el mismo y por tanto la presión de impulsión es constante. Este paso también puede requerir de varios intentos, pues el punto exacto para el correcto funcionamiento es bastante concreto, en especial la dificultad aumenta cuanto mayor la presión de impulsión que se ha establecido.
- ❖ Tras unos instantes en los que se haya comprobado que todo funciona acorde a lo establecido, se podrá comenzar a la medición de los caudales. Para cada valor de presión de impulsión obtengamos un valor concreto de caudal impulsado y de caudal expulsado a través de la válvula de ariete. Después, y utilizando ambos recipientes graduados, uno para el caudal que afora por la válvula de ariete y otro para el propio caudal impulsado, se procede a la contabilización de los litros que emergen por ambas partes.

- ❖ Si bien es cierto que para recoger el flujo impulsado no sería necesario, para el caudal de la válvula de ariete no encontramos ante la peculiaridad de que necesitamos un recipiente abierto (y de cierta capacidad) para poder medirlo. Dado que no se dispone de ningún recipiente que cumpla con estas condiciones, se ha optado por construir una solución. Para ello se han empleado dos recipientes de plástico, los que se pueden ver en la *Figura 3.21*, lo más uniformes posibles en su geometría. Posteriormente se han llenado de un volumen de agua conocido, ya que se había pesado previamente. En un primer paso se ha hecho una división más amplia de cinco en cinco litros, para después realizar una segunda división más fina de litro en litro. Visto la uniformidad de la graduación obtenida, finalmente se dividió geoméricamente esta diferencia de litro en litro en unidades de medio de litro. Finalmente, y tras anotar la medida de los caudales medidos como en la *Figura 3.22*, se hará uso de un cronómetro se conseguirá obtener el valor de los litros por minuto que tendremos.



**Figura 3.21** – Recipientes graduados



**Figura 3.22** – Medición de los caudales

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos, para las diferentes alturas de impulsión, se utilizarán para crear una curva característica que será comparada con valores teóricos y experimentales obtenidos de textos de la bibliografía (*Iversen, 1975; Smith, 2015*). Analizaremos además la eficiencia de la bomba, para lo que se comparará el volumen de caudal impulsado frente al del caudal de aspiración que se tiene junto con la relación de las presiones de aspiración y de impulsión que se hubieran fijado para ese experimento.

Antes de entrar en detalle en los resultados, se quiere hacer mención a la nomenclatura utilizada, que aparece en la *Figura 4.1*, para que quede claro a que concepto representa cada uno.

<b>Qt = caudal de aspiración</b>
<b>Qp = caudal de impulsión</b>
<b>h = presión de impulsión</b>
<b>H = presión de aspiración</b>

*Figura 4.1 – Leyenda de los datos empíricos*

Para la obtención de los datos a continuación, se ha realizado una doble comprobación de las siete medidas. Para ello se ha realizado dos veces la medición para cada una de las siete situaciones de presión de impulsión. Los valores de caudal de la *Tabla 4.1* son la media de ambos valores para cada punto, ya que en ninguno de los casos han aparecido valores anormales que se diferencien entre ellos más de un 5%. Con las condiciones de presiones establecidas en la *Tabla 3.5*, se procede ahora, en la *Tabla 4.1*, al desglose de los resultados obtenidos. En ella se puede ver un resumen de los resultados obtenidos para cada configuración.

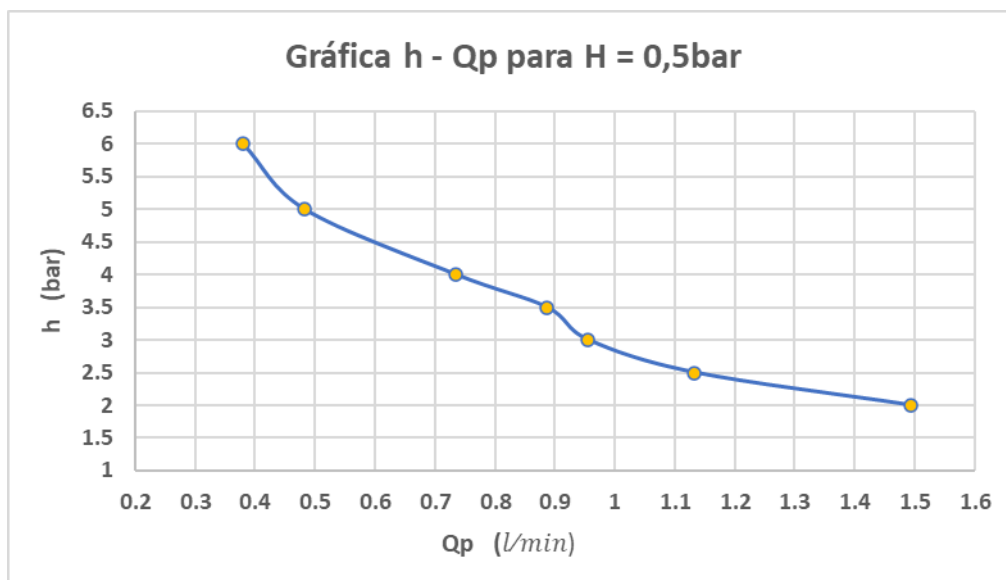
	h	H	h/H	Qp	Qt	Qp/Qt %	≈ Ciclos / min	Eficiencia %
1	2.00	0.50	4	1.49	8.46	17.6471	80	70.59
2	2.50	0.50	5	1.13	8.72	12.9944	90	64.97
3	3.00	0.50	6	0.96	8.79	10.8647	85	65.19
4	3.50	0.50	7	0.89	8.96	9.8901	90	69.23
5	4.00	0.50	8	0.74	9.07	8.1081	80	64.86
6	5.00	0.50	10	0.48	9.17	5.2632	85	52.63
7	6.00	0.50	12	0.38	9.12	4.1667	90	50.00
	bar			l/min				

*Tabla 4.1 – Resumen de los resultados obtenidos*

Si nos centrásemos en los datos de caudales, se aprecia que el resultado obtenido es algo mayor al que cabría esperar por el valor teórico de la *Tabla 2.3*, tanto en el caudal aspirado como en el impulsado. El valor que debemos comparar con el de esa tabla será el experimento número 2, ya que es el que cumple la condición de una ratio de 1:5 entre  $H$  y  $h$ . Este aumento demuestra que la elección de la ubicación de válvula de ariete en una situación más retrasada permite una mayor entrada de flujo en el cuerpo de la bomba. Las relaciones  $Q_p/Q_t$  y  $h/H$ , que se han incluido también en esta última tabla, nos serán esenciales para el cálculo del rendimiento de la bomba. A mayor presión de impulsión, se conseguirá impulsar una menor cantidad de caudal, ya que se deberá utilizar más cantidad de flujo como “energía” para conseguir vencer esa diferencia de presiones entre la aspiración y la impulsión. Por tanto, cuanto mayor sea la relación de presiones que se busca, menor será la relación de los caudales.

Además, se ha procedido al estudio de la eficiencia de la bomba, utilizando la formulación del apartado 2.2.3, obteniéndose los resultados que se han incluido en la *Tabla 4.1*. La eficiencia disminuye a medida que aumenta la relación de presiones debido al drástico descenso del caudal impulsado en esas circunstancias.

Una vez tenemos estos datos, podemos crear la curva característica de la *Figura 4.2*. En ella se puede apreciar el descenso del caudal impulsado según se va aumentando la altura de impulsión no es lineal, quedándose los valores obtenidos siempre por debajo de esa hipotética línea que uniera los puntos extremos calculados.



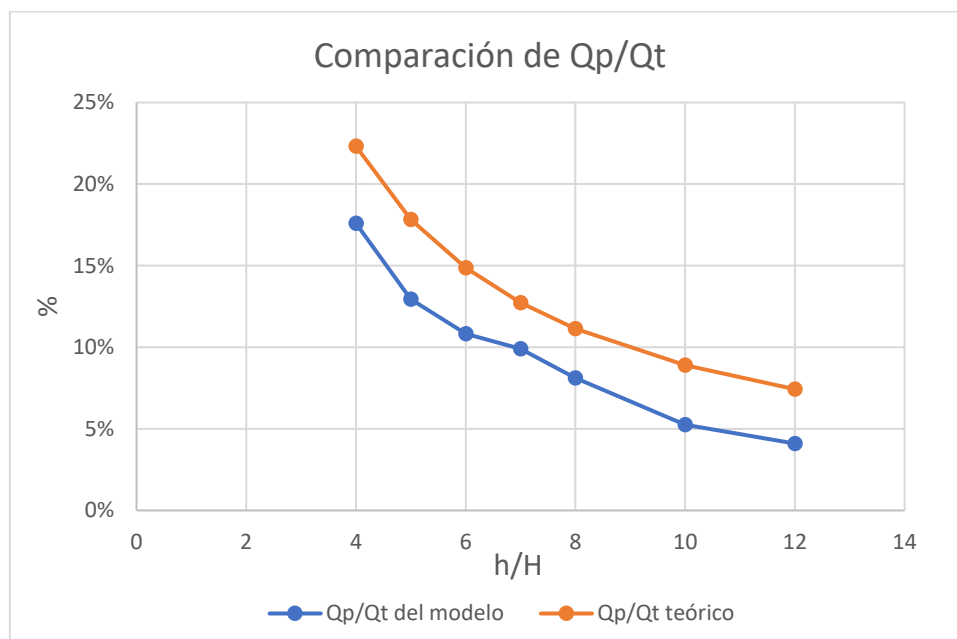
**Figura 4.2** – Curva característica para  $H = 0.5$  bar

Se procederá ahora, con el uso de las fórmulas del apartado 2.2.3 provenientes de la bibliografía (Iversen, 1975), al cálculo teórico de los valores de la ratio de caudales  $Q_p/Q_t$  y de la eficiencia. De esta manera, en la *Tabla 4.2* se pueden comparar los resultados obtenidos frente a los que se tenían en la *Tabla 4.1*.

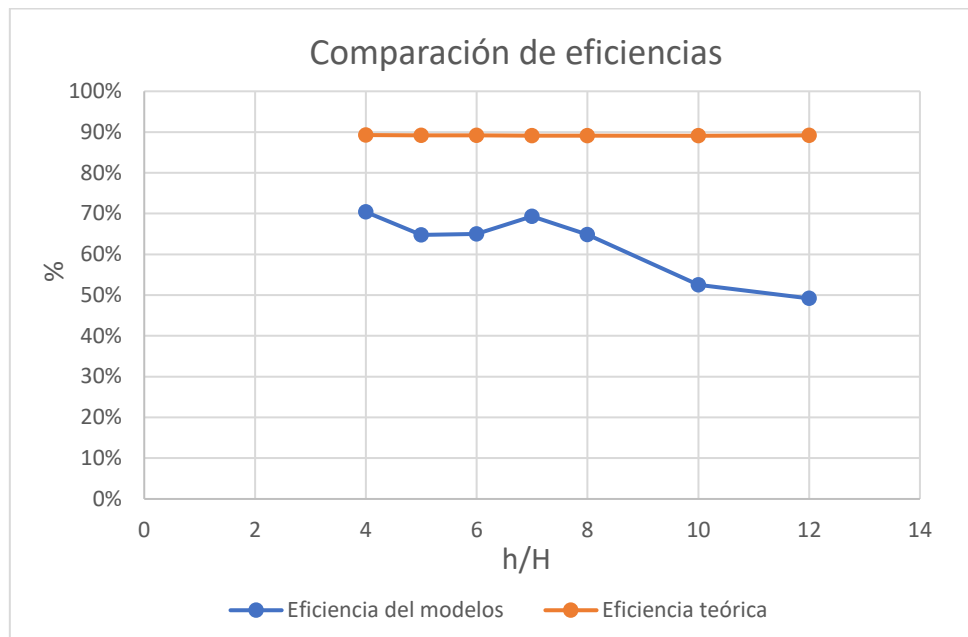
	Modelo construido		Teóricos (Iversen, 1975)	
	Qp/Qt %	Eficiencia %	Qp/Qt %	Eficiencia %
1	18%	70%	22%	89%
2	13%	65%	18%	89%
3	11%	65%	15%	89%
4	10%	69%	13%	89%
5	8%	65%	11%	89%
6	5%	53%	9%	89%
7	4%	49%	7%	89%

**Tabla 4.2** – Resultados empíricos y resultados teóricos

Se aprecian diferencias entre los valores obtenidos y los teóricamente esperables, especialmente en cuanto a la eficiencia de la bomba. Graficando los resultados, en las *Figuras 4.3* y *4.4* se pueden denotar más claramente estas diferencias.



**Figura 4.3** – Comparación de  $Q_p/Q_t$



**Figura 4.4 – Comparación de eficiencias**

Aunque no coincidan exactamente en sus valores, vemos en la *Figura 4.3* que las curvas generadas siguen una distribución muy similar en su forma. Las diferencias en la ratio de los caudales  $Q_p/Q_t$  se sitúan de media en un 3.7%. Un valor relativamente bajo que se deba probablemente a un conjunto de detalles como pequeños errores en las medidas en los recipientes aforados, el desgaste de la válvula de ariete y la antirretorno debido a su uso o alguna pérdida de fluido en la manguera que conduce el agua impulsada hasta el recipiente aforado. Aún así, sigue siendo un buen indicador de los valores esperables en el caso de la construcción de un modelo a una mayor escala.

Sin embargo, la disminución de la eficiencia del modelo frente a la teórica esperable si es mayor, en especial en los valores de presión de impulsión más elevados. Aunque el caudal impulsado si se mantiene en la tendencia de los ensayos con menos presión de impulsión, se denota que no merece la pena superar una ratio de 1:8 en las presiones, ya que la eficiencia disminuye drásticamente a partir de ese punto.



## 5 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Este proyecto no se quería limitar exclusivamente al estudio teórico de la bomba de ariete, con sus parámetros y sus valores, sino que quería obtener un modelo físico construido de manera artesanal que pudiera refutarlos. Los objetivos principales del estudio eran: conocer los parámetros que rigen su funcionamiento y corroborar que es una alternativa viable en su utilización. Si bien es cierto que en los núcleos urbanos no es una opción efectiva, en zonas rurales aisladas o donde el agua sea un recurso casi ilimitado, la posibilidad de poder elevar agua sin la utilización de electricidad o combustibles fósiles es impagable. Especialmente en estos tiempos en los que las emisiones que provocan el cambio climático deberían ser una de nuestras principales preocupaciones. Además, la utilización de un canal que devolviera a la fuente original el agua que emerge a través de la válvula de ariete reduciría el impacto sobre el medio a prácticamente 0.

El funcionamiento de la bomba de ariete, aunque simple en su mecanismo ya que no precisa apenas de actuaciones sobre ella una vez que comienza a funcionar, se puede volver complejo si no se consigue principalmente establecer unas condiciones de contorno controladas y razonables. En la fase experimental se necesitó recrear unas condiciones de aspiración e impulsión mediante el uso de válvulas y calderines. Esto dificultó en cierto grado conseguir que el modelo que se había construido funcionara para todas esas circunstancias. Sin lugar a dudas, y disponiendo además de la experiencia obtenida en la primera fase de la construcción (dónde se utilizó un depósito elevado como fuente del flujo de aspiración), la situación ideal para la instalación de este tipo de bombas sería la entrada de agua a través de una tubería que conectara con alguna pequeña represa que nos permitiera disponer de un flujo continuo que fuera constante en su presión. De igual manera, las limitaciones del modelo nos avocan a no superar una ratio de 1:8 entre  $H$  y  $h$  si se quieren obtener unos resultados válidos, ya que los ajustes a realizar en la válvula de ariete pueden volverse demasiado complejos.

En relación con los datos empíricos obtenidos, los que denotan que pueda ser una alternativa viable en pequeños núcleos rurales son dos. El primero es la relación de caudales  $Q_p/Q_t$ , de la *Tabla 4.1*, que según aumenta la presión de impulsión, disminuye; pero que consigue unos valores superiores al 10% incluso en situaciones de una ratio 1:7 entre  $H$  y  $h$ .

El otro es la eficiencia de la bomba, que como se ha podido ver a lo largo de estudio, va a estar definida por la relación de caudales y de presiones. En la *Tabla 4.1* están recogidos los valores obtenidos para la misma. A pesar de que disminuye hasta el 50% en la relación de presiones más alta, en los valores más bajos consigue un notable 70%.

Los resultados indican que hasta prácticamente llegar a una ratio 1:6 en las presiones (de 0.5 bares en aspiración a 3 bares en la impulsión) se consigue estar por encima de la

barrera de un litro impulsado por minuto. Con esto conseguiríamos impulsar cantidades cercanas 1.500l cada día sin ningún tipo de energía externa y utilizando el modelo de dimensiones más pequeñas. Si se quieren lograr alturas bastante elevadas, la solución a adoptar debería ser la de añadir más desnivel entre la fuente de la aspiración y el cuerpo de la bomba, pues forzar demasiado la ratio entre las presiones provoca que el caudal impulsado sea demasiado bajo y que las posibilidades de una parada de la bomba se incrementen.

## 6 REFERENCIAS

Jung B.S., Karney B.W., Boulos P.F., Wood D.J. (2007). *The Need for Comprehensive Transient Analysis of Distribution Systems*, Journal of AWWA, 112-123.

Iversen, H. W. (June 1, 1975). *An Analysis of the Hydraulic Ram*. ASME. *J. Fluids Eng.* June 1975; 97(2), 191–196.

Smith, W. B. (2019). *Homemade Hydraulic Ram Pump for Livestock Water*.

Ghidaoui, M. S., Zhao, M., McInnis, D. A., & Axworthy, D. H. (2005). *A review of water hammer theory and practice*. *Appl. Mech. Rev.*, 58(1), 49-76.

Shames, I. H., Moneva, J. M., & Crusells, S. P. (1995). *La mecánica de los fluidos* (Vol. 2). Colombia: McGraw-Hill.

Castillo Elsitdié, L.G. (2018). *Apuntes de la asignatura Obras Hidráulicas*. Departamento de Ingeniería Minera y Civil. Área de Ingeniería Hidráulica. Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España.