

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos.

Área de Ingeniería Térmica



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

# **ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE LA BOMBA DE ARIETE**

**Autor: FRANCISCO JAVIER ACITORES MARTÍNEZ**

**Directores: PABLO MARTÍNEZ-LEGAZPI AGUILÓ  
ULPIANO RUIZ-RIVAS HERNANDO**

Ingeniería Superior Industrial

Madrid, Febrero de 2012



## Agradecimientos:

*A mi madre, que tiene unos cojones como el caballo de Espartero.*

*También me gustaría dar las gracias a Pablo y a Ulpiano, por darme la oportunidad de llevar a cabo este proyecto, así como por la paciencia en algunos casos.*

*A mis compañeros y amigos de carrera, tanto a que los que perdimos tras la primera tanda de exámenes, como a los que aguantaron algún año más y a los que finalmente llegaron o van llegando al final de este túnel que a veces parecía no tener fin.*

*A Mónica, por quererme y alegrarme la vida, incluso cuando no lo merecía.*

*A todos ellos. Pero en especial, a mi madre, GRACIAS.*



## Contenido

1	INTRODUCCIÓN .....	3
2	ESTADO DEL ARTE .....	5
2.1	Abastecimiento de agua.....	5
2.1.1	Necesidades básicas de agua .....	6
2.1.1.1	Cantidad de agua necesaria para el consumo directo .....	6
2.1.1.2	Cantidad de agua necesaria para la elaboración de comida.....	7
2.1.1.3	Cantidad de agua necesaria para la higiene.....	7
2.1.1.4	Consumo total mínimo por habitante.....	8
2.1.1.5	Diferencias entre países .....	8
2.1.2	Introducción del concepto VLOM .....	10
2.2	Bomba de ariete.....	10
2.2.1	Teoría del golpe de ariete .....	10
2.2.2	¿Qué es una bomba de ariete? .....	13
2.2.3	Partes de una instalación de bomba de ariete.....	13
2.2.3.1	Tubería de alimentación (2) .....	13
2.2.3.2	Tubería de salida o de elevación (3).....	14
2.2.3.3	Bomba de ariete (4).....	14
2.2.3.3.1	Válvula de NR (No Retorno). .....	14
2.2.3.3.2	Válvula de choque .....	15
2.2.3.3.3	Caja de válvulas .....	15
2.2.3.3.4	Cámara de aire o pulmón.....	16
2.2.4	Explicación básica del funcionamiento de la bomba de ariete .....	16
2.2.5	Algunos tipos constructivos de bombas de ariete .....	19
2.2.5.1	Bombas de ariete trabajando en serie y en paralelo .....	20
2.2.5.2	Ariete de aguas bravas .....	21
3	MODELO TEÓRICO.....	22
3.1	División en fases.....	22
3.2	Nomenclatura del análisis realizado .....	23
3.3	Análisis y resolución de cada una de las fases: .....	26
3.3.1	FASE 1 .....	26
3.3.2	FASE 2 .....	28

3.3.3	FASE 3 .....	31
3.3.4	FASE 4 .....	34
3.3.5	FASE 5 .....	36
3.3.6	FASE 6 .....	37
3.4	Recapitulación y definición de algunos conceptos. ....	39
3.5	Determinación de las constantes de operación.....	40
3.6	Sistema de ecuaciones en MathCad .....	45
4	INSTALACIÓN EXPERIMENTAL.....	49
4.1	Búsqueda y adquisición de la primera bomba .....	50
4.2	Diseño y Montaje de la instalación .....	50
4.2.1	Depósito elevado o de abastecimiento.....	51
4.2.2	Depósito de alimentación .....	52
4.2.2.1	Regulador de nivel del depósito de alimentación.....	55
4.2.3	Tubería de alimentación.....	56
4.2.4	Bomba de ariete.....	59
4.2.5	Tubería de elevación .....	59
4.2.6	Circuito de achique o recirculación.....	60
4.2.7	Circuito de recogida del agua elevada .....	62
4.3	Técnica de medida .....	62
4.3.1	Aparatos de medida .....	62
4.3.2	Procedimiento de medida.....	63
4.4	Presupuesto .....	64
5	RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	66
5.1	Efecto del ángulo de inclinación de la tubería de alimentación, $\alpha$ .....	67
5.2	Efecto de la altura de elevación, h .....	69
5.3	Efecto de la altura de alimentación, H.....	72
5.4	Efecto de la longitud de la tubería de alimentación, L.....	75
6	CONCLUSIONES .....	78
6.1	Posibles líneas de acción para futuros proyectos .....	79
7	BIBLIOGRAFÍA.....	80
7.1	Páginas web consultadas: .....	81
8	ANEXOS .....	82

## 1 INTRODUCCIÓN

Este proyecto se enmarca dentro de la iniciativa de la Universidad Carlos III de Madrid de mantener un laboratorio de tecnologías apropiadas para el abastecimiento de agua. Este laboratorio se ubica en un espacio habilitado para la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III e incluye varios bancos de ensayos para diferentes tipos de bombas manuales, sistemas de bombeo alimentados con paneles fotovoltaicos, sistemas de filtración y potabilización, cocinas solares, y otros tipos de tecnologías.

El objeto de este proyecto es ampliar esta plataforma docente que disfrutamos hoy en día, añadiendo una tecnología que no se había tenido en cuenta hasta el momento: la bomba de ariete. Se trata de una tecnología que no se puede catalogar como manual, pues no precisa la acción humana para funcionar, pero que en determinadas circunstancias puede resultar de gran utilidad para elevar agua a alturas considerables. Este proyecto se postula como el primero de la Universidad centrado en esta nueva línea de bombas de agua, con la consecuente complicación del desconocimiento inicial del campo a tratar.

El proyecto ha constado desde el principio en dos líneas de trabajo simultáneas. La primera trataba del diseño y la construcción dentro del laboratorio de un banco de ensayos apto para varios tipos de bombas de ariete, mientras que en la segunda línea nos centraríamos en el estudio detallado de las ecuaciones que rigen el funcionamiento de este tipo de bombas, para tratar de crear algún tipo de modelo teórico que se acercara al menos a proporcionarnos algún resultado mínimamente fiable.

Mi objetivo personal al enfrentarme a este proyecto era conocer más profundamente tanto las tecnologías apropiadas como la labor que desde un ambiente universitario se puede

desarrollar hacia la cooperación internacional, ya que es un tema al que con el paso de los años, cada vez tengo más claro que quiero dedicar mi carrera profesional.

El presente escrito se estructura en cuatro grandes bloques o capítulos, de la siguiente manera:

- El primer bloque que se dividirá en dos partes. En la primera se tratará de describir la situación actual de la humanidad con respecto a la falta de abastecimiento de agua en algunas zonas del planeta, se intentará conseguir un dato de la cantidad de agua necesaria para abastecer al ser humano y se mostrará el consumo actual de agua en las sociedades. En la segunda parte de este primer bloque se explicará todo lo relativo a la bomba de ariete: qué es, cómo funciona,...
- El segundo gran bloque consiste en la explicación del modelo teórico que hemos utilizado para simular el comportamiento de la bomba de ariete. Intentaremos explicar por qué se ha elegido este modelo, qué términos hemos considerado despreciables y por qué,... para finalmente presentar el sistema de ecuaciones elaborado en MathCad.
- En el tercer bloque contamos cómo hemos diseñado y construido el banco de ensayos, explicando las decisiones que hemos ido tomando, y mostrando fotografías de cómo han ido quedando las diferentes partes de la instalación, a menudo comparadas con la versión digital que hemos desarrollado en AutoCAD.
- En el cuarto bloque presentamos los resultados de la caracterización preliminar de la primera bomba de ariete, tanto experimental como teóricamente, intentando ver el efecto que tiene en el funcionamiento de la bomba la modificación de uno u otro aspecto de la instalación, tras lo que comentamos y valoramos los resultados obtenidos cada caso.
- Finalmente se concluye con las conclusiones sacadas del trabajo realizado y unas sugerencias sobre lo que podrían ser trabajos futuros que siguieran la senda de este proyecto.



## **2 ESTADO DEL ARTE**

En este primer capítulo introduciremos el problema de agua en el planeta en general, y en el tercer mundo en particular. Intentaremos aportar una cifra de consumo mínimo de agua por habitante y día de que asegura un mínimo de calidad de vida, y luego veremos el consumo por habitante real en cada país, de forma que podamos apreciar en cierto modo el nivel de desabastecimiento que tenemos en ciertas zonas del planeta.

En una segunda parte, explicaremos los conceptos teóricos necesarios para entender el funcionamiento de una bomba de ariete, para a continuación identificar y definir las diferentes partes en las que se divide tanto una instalación de bomba de ariete como la propia bomba de ariete, de forma que quede lo más claro posible al lector cómo funciona este particular invento.

### **2.1 Abastecimiento de agua**

El agua constituye un elemento natural indispensable para el desarrollo de la vida y de las actividades humanas; resulta complicado imaginar cualquier tipo de actividad en la que no se utilice, de una u otra forma.

Actualmente, según datos de la World Health Organization (WHO), se estima que 1.200 millones de personas carecen de acceso seguro al agua, es decir, casi una de cada 5 personas en el mundo carece de cualquier tipo de infraestructura que le permita abastecerse de agua con cierta garantía.

Esta cifra indica el nivel de desigualdad en el que se encuentra la población mundial.

La falta de acceso a una fuente de agua, así como la carencia de sistemas de saneamiento no sólo conlleva una degradación sustancial del nivel de vida, sino que trae consigo una cantidad de consecuencias directas terribles como pueden ser las siguientes:

- Numerosas enfermedades relacionadas con el agua: Diarreicas, cutáneas y oculares, parasitarias, infecciones por insectos, etc.
- 5 millones de muertes anuales relacionadas con el agua.
- 2 millones de niños mueren al año afectados por la contaminación del agua, fundamentalmente por enfermedades diarreicas.
- El 80% de las enfermedades en países empobrecidos están asociadas al agua.

Además, debido al crecimiento continuo de la población mundial, se prevé que estos datos se vean incrementados para el año 2025, según estimaciones de las Naciones Unidas.

Salta a la vista que la falta de acceso al agua es un problema de salud mundial de primer orden, y que no debe ser ignorado por los países desarrollados. La labor internacional es importantísima e imprescindible en este aspecto.

En el año 2000, las Naciones Unidas, en su Asamblea General, definieron los 8 Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), para cuya consecución será determinante la gestión del problema de la escasez de agua en el planeta.

### **2.1.1 Necesidades básicas de agua**

En este apartado, vamos a tratar de valorar cuál es la cantidad mínima que el ser humano necesita consumir. Para ello nos plantearemos cuáles son las necesidades mínimas que deberían estar garantizadas de forma que permitieran mantener un nivel de vida aceptable en cuanto al abastecimiento de agua.

Existen diferentes planteamientos a la hora de considerar cuáles son estos hábitos imprescindibles para garantizar la salud pública. Nosotros nos basaremos en la definición de la OMS, que encuadra como imprescindible el agua empleada en el baño, la preparación de alimentos y la ingesta directa. El siguiente paso será determinar cuánta cantidad bastará para poder llevar a cabo estos hábitos fundamentales.

#### **2.1.1.1 Cantidad de agua necesaria para el consumo directo**

El cuerpo humano necesita agua para llevar a cabo multitud de procesos corporales. La cantidad necesaria depende de multitud de variables, tanto ambientales como personales. Si no se consume una cierta cantidad de agua puede llegarse a casos de deshidratación, siendo ésta el origen de multitud de afecciones.

Según un estudio de la OMS, el volumen de agua imprescindible para asegurar la hidratación es el que se muestra en la tabla 2.1, dependiendo del sexo y la edad del sujeto, así como de la actividad física y de las condiciones ambientales:

	Volumen de agua (litros/día)		
	Condiciones medias	Trabajo a altas temperaturas	Necesidades en periodo de embarazo
Mujer	2,2	4,5	4,8 - 5,5
Hombre	2,9	4,5	-
Niño/niña	1,0	4,5	-

Tabla 2-1 – Volumen de agua imprescindible para asegurar hidratación.

Fuente: Organización Mundial de la Salud

### 2.1.1.2 Cantidad de agua necesaria para la elaboración de comida

El agua es también fundamental en el proceso de preparación diaria de la comida de una persona. Sin embargo, la cantidad mínima necesaria no es fácil de hallar, ya que puede depender de los hábitos alimenticios de cada cultura o de su nivel de desarrollo. Un valor mínimo puede ser el obtenido en una dieta rica en cereales, con lo que será suficiente una cantidad de agua que sirva para preparar estos cereales. Un ejemplo típico es el arroz, que para cocinar 600 gramos diarios se estima un empleo de 1,6 litros de agua.

Otros Estudios, como el llevado a cabo por Thompson en 2011, revelan que la cantidad ha de estar en torno a los 5 litros por habitante.

Nosotros tomaremos como válidas las recomendaciones de la WHO, que estima en 2 litros la cantidad mínima diaria necesaria para la preparación de alimentos.

### 2.1.1.3 Cantidad de agua necesaria para la higiene

La higiene es la necesidad básica que más agua necesita emplear, incluso por encima del consumo directo y de la preparación de comida juntas. La utilización de agua contaminada o de una higiene insuficiente es el origen de un gran número de enfermedades graves, muchas de las cuales llevan a la muerte a millones de personas.

A la hora de evaluar la cantidad imprescindible, siempre nos encontramos con el debate de si es más importante la cantidad de agua necesaria, la calidad de ésta o la facilidad de acceso a la misma.

La siguiente tabla 2.2 recoge algunos indicadores del Proyecto Esfera de requisitos mínimos en cuanto a saneamiento:

	Indicador PROYECTO ESFERA
Requisito mínimo de agua limpia (litros/persona/día)	15
Distancia mínima desde el hogar a una toma de agua o a puntos de distribución (metros)	500
Máximo número de personas por toma de agua	250

Tabla 2-2 – Principales indicadores de las necesidades de agua para mantener una condición mínima de higiene

#### 2.1.1.4 Consumo total mínimo por habitante

A partir de las tres categorías anteriores y de los diferentes estudios llevados a cabo en cada una de ellas, la OMS valoró como cantidad básica para garantizar la supervivencia los 20 litros por persona y día, aunque para asegurar la salud esta cantidad deberá ser de al menos 50 litros por persona y día, como se refleja en la figura 2.1. También valoró una cantidad que sería la mínima aconsejable, de 75 litros, que asciende hasta 100 en caso de considerar otros usos necesarios para el desarrollo como son la agricultura, la industria y la protección de los ecosistemas.

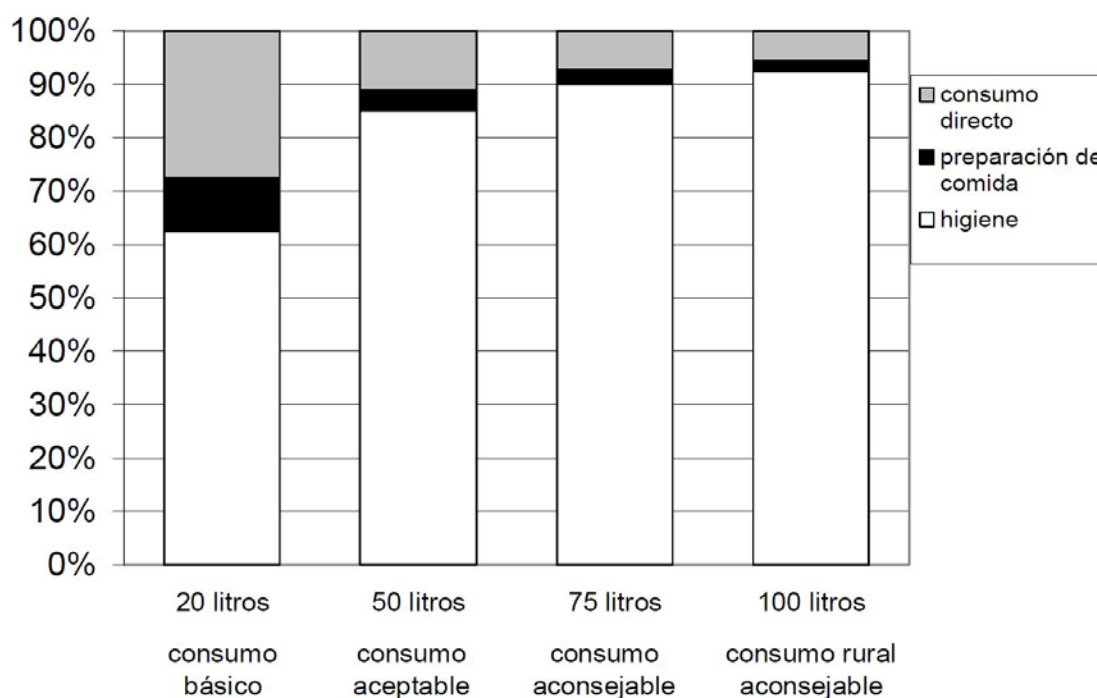


Figura 2-1 – Porcentaje de agua empleada en la higiene, en la preparación de comidas y en el consumo directo para distintos abastecimientos de agua por persona y día. Fuente: OMS

#### 2.1.1.5 Diferencias entre países

Como hemos concluido anteriormente, las necesidades mínimas de agua por persona para asegurar condiciones saludables han de ser de al menos 50 litros por persona y día. Sin embargo, aunque en los últimos tiempos se han llevado a cabo algunos progresos en cuanto a la falta de agua, observando el gráfico 2.2, podemos comprobar que aún hay muchos países que están lejos de alcanzar esa cifra. Por lo que podemos asumir que la humanidad tiene aún una gran asignatura pendiente en este aspecto.

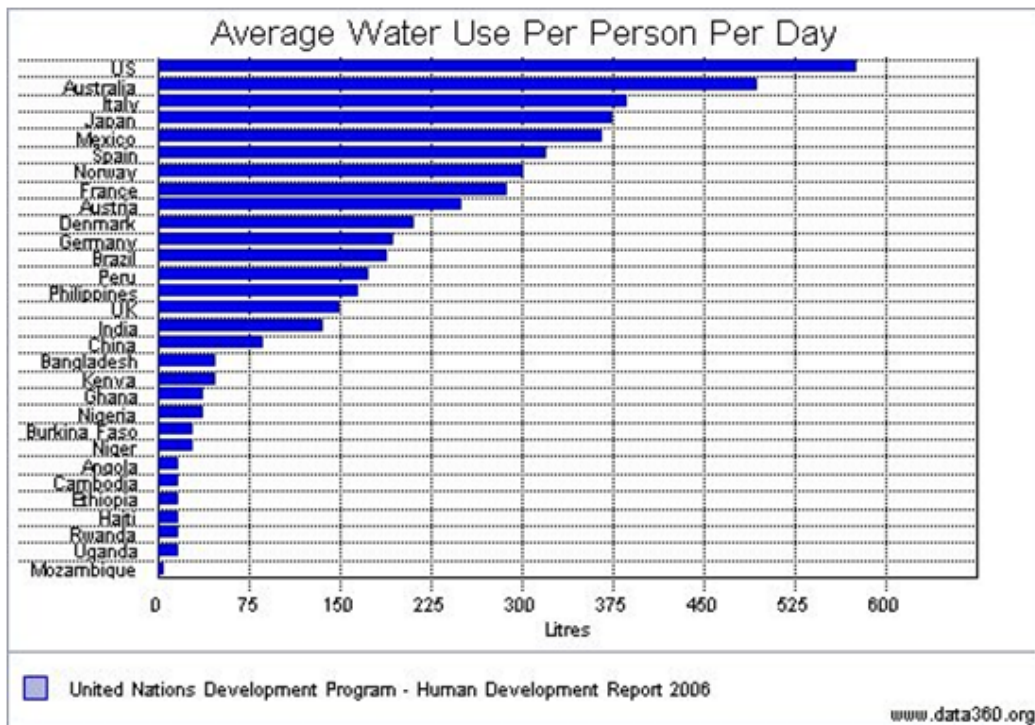


Figura 2-2 – Cantidad media de agua dulce utilizada por persona y día por países  
Fuente: www.data360.org

Comúnmente se comete el error de asociar la escasez de agua con la sequía propia de algunas zonas de la Tierra. Sin embargo, en la siguiente figura se representa la cantidad de recursos hidrográficos por países:

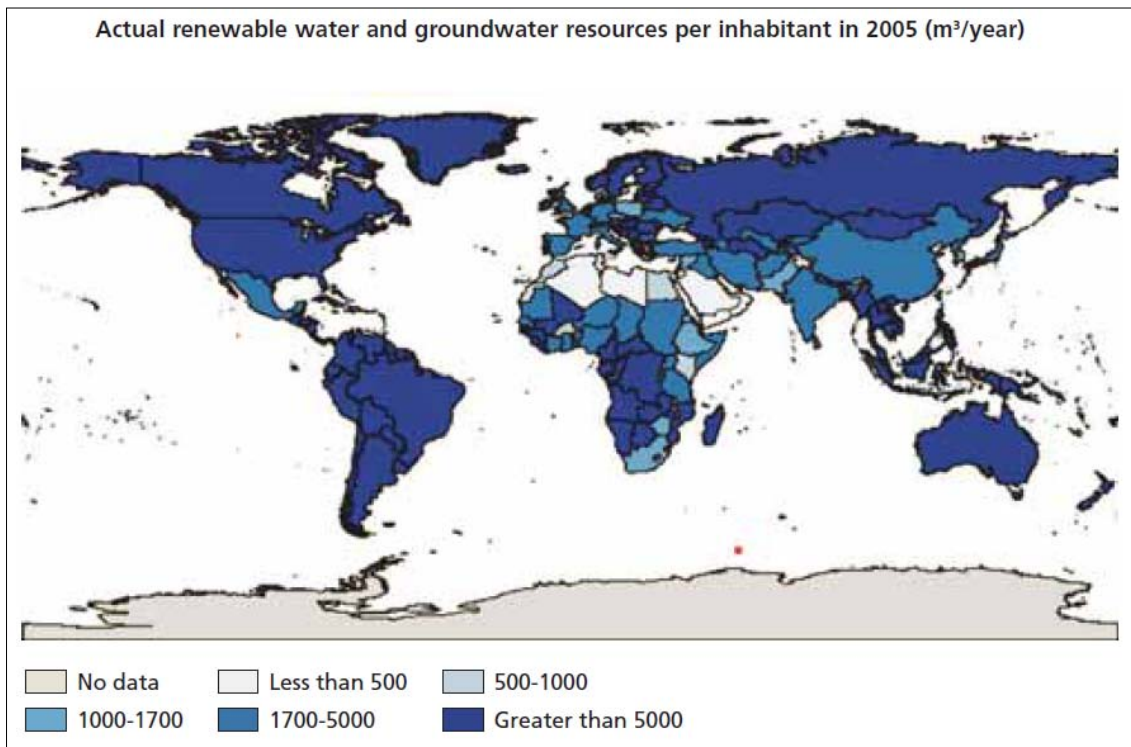


Figura 2-3 - Fuente: Food and Agriculture Organization of the United Nations

Con un simple vistazo al panorama mundial, se observa que en gran cantidad de países de África y en casi la totalidad de América Latina, esta escasez de agua no es debida a la falta de

recursos naturales, sino que es la acción del hombre la gran responsable, con sus actos o la falta de ellos, de la situación en la que nos encontramos actualmente.

### **2.1.2 Introducción del concepto VL0M**

Uno de los obstáculos encontrados en el ámbito de la cooperación internacional para alcanzar los objetivos de Desarrollo del Milenio en el agua y la reducción de la pobreza ha radicado siempre en la elección errónea de tecnologías utilizadas. El ejemplo más claro es la aplicación de tecnologías demasiado complejas para los usuarios finales. Como respuesta a un gran número de fracasos obtenidos en los años 80 con las bombas instaladas hasta entonces, nació el concepto VL0M.

El concepto VL0M (Village Level Operation and Management of Maintenance) fue desarrollado por expertos internacionales en un programa del Banco Mundial junto con el PNUD. El programa promovió el desarrollo de nuevos tipos de bombas manuales que cumplieran los requisitos del concepto VL0M:

- Ser fáciles de mantener por un empleado que disponga de unos conocimientos mínimos y de las herramientas correspondientes.
- Fabricarse dentro del mismo país, sobre todo para asegurar la disponibilidad de repuestos.
- Tener una constitución robusta.
- Ser económicamente rentable.

La aplicación de este nuevo concepto a las bombas manuales instaladas tuvo algunos problemas en sus primeras aplicaciones prácticas, pero con el tiempo se consolidó como un sistema que mejoró notablemente las perspectivas de éxito de los equipos operativos.

## **2.2 Bomba de ariete**

En este apartado explicaremos brevemente en qué consiste el fenómeno del golpe de ariete, pasando después a definir los componentes de una instalación completa de una bomba de ariete, centrándonos luego en la propia bomba de ariete, y después plantearemos un esquema del sistema de funcionamiento de la bomba, con los procesos que se llevan a cabo en su interior.

### **2.2.1 Teoría del golpe de ariete**

El golpe de ariete es un fenómeno que puede producirse en tuberías largas, cuando se detiene bruscamente una columna de agua que se desplaza por su interior. Ocurre en la vida diaria con frecuencia. Un ejemplo de ello es el ruido estruendoso que en ocasiones se produce en instalaciones antiguas, cuando al cerrar un grifo retumba la tubería entera. Ese ruido es señal

de que el agua que se desplazaba a una cierta velocidad se ha detenido casi instantáneamente, transmitiendo de golpe la energía cinética que poseía.

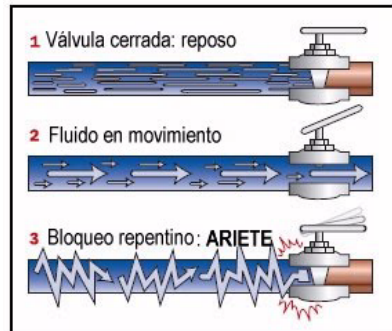


Figura 2-4. Proceso del golpe de ariete en una tubería.  
Fuente: <http://notaculturaldeldia.blogspot.com>

En realidad, no todo el fluido se detiene a la vez, sino que cuando el grifo se cierra de golpe, el agua que está en el extremo cercano al grifo se detiene, mientras que el agua que circula por el resto de la tubería se sigue desplazando a la misma velocidad que tenía antes. En ese momento se produce una onda de choque que parte desde el grifo, desplazándose por el fluido en dirección contraria a su movimiento a una velocidad cercana a la del sonido ( $c$ ). Esta onda de choque va deteniendo el fluido a su paso, y transformando la velocidad que poseía este ( $v_0$ ) en un aumento de presión ( $\Delta P$ ) (Figura 2.a). Si esta onda de presión encuentra un depósito o un volumen grande de agua, se disipa. Sin embargo, la tubería se habrá quedado a una presión mucho mayor que la de este depósito. En este momento se generará otra onda de choque de la misma magnitud que la primera, pero esta vez en sentido contrario, devolviendo al fluido la presión que poseía inicialmente, y proporcionándole una velocidad igual a la que tenía antes de que se cerrara el grifo, pero esta vez en sentido contrario (Figura 2.b).

Cuando esta segunda onda de choque llegue de nuevo al final de la tubería (al extremo del grifo cerrado), todo el fluido de la tubería estará desplazándose hacia el depósito a la velocidad inicial,  $v_0$ . Esto ocasionará una falta de agua en este extremo de la tubería, tras lo que nacerá una tercera onda de choque que viajará desde el grifo hasta el depósito, con la misma fuerza que las anteriores, deteniendo a su paso el agua, y reduciendo la presión de la tubería a niveles muy bajos (Figura 2.c). Cuando esta tercera onda llegue al depósito, estaremos de nuevo ante un desequilibrio, dada la baja presión del fluido en la tubería, por lo que una cuarta onda de choque, que viajará desde el depósito hasta el grifo, pondrá de nuevo al fluido en movimiento a una velocidad igual a la inicial, hacia el grifo, y a una presión igual a la inicial (Figura 2.d).

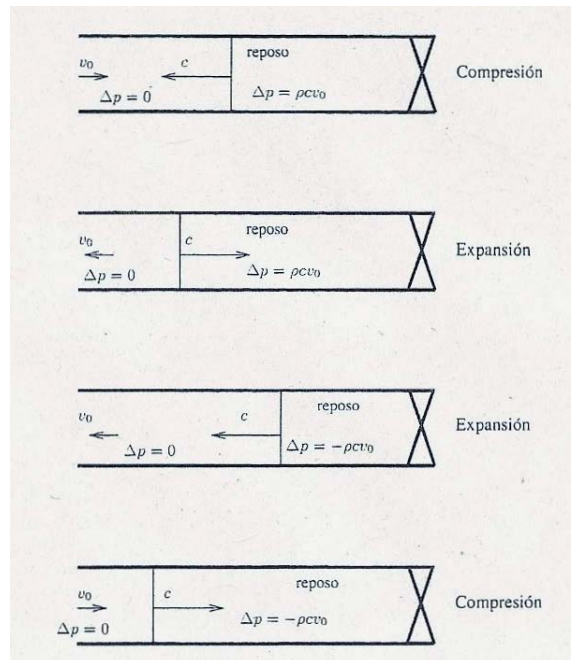


Figura 2-5. Onda de compresión generada por el cierre súbito de una válvula.  
 Refracciones y reflexiones de la misma en el depósito y en la válvula.  
 Fuente: 'Mecánica de fluidos', de A. Crespo Martínez

Cuando esta cuarta onda llegue hasta el grifo, estaremos en una situación exactamente igual a la que teníamos en el instante en el que se cerró el grifo, por lo que todo el proceso de las 4 ondas de choque se repetirá indefinidamente (realmente no es así debido a la existencia de pérdidas por las que las ondas de choque van perdiendo fuerza hasta desaparecer).

Obsérvese que durante el proceso de las 4 ondas de choque, se produce tanto una fuerte sobrepresión (con la primera onda) como una fuerte depresión (con la tercera onda) en la tubería. Normalmente los dos cambios de presión son perjudiciales para las tuberías, sin embargo, la construcción cilíndrica de las tuberías hace que estas sean más resistentes a las altas presiones que a las depresiones, siendo esta última la causa de la mayoría de las consecuencias desastrosas del denominado "golpe de ariete". En la figura 3 podemos ver unos conductos destruidos por la depresión generada tras un fuerte golpe de ariete.



Figura 2-6. Tuberías estropeadas por la depresión provocada por el golpe de ariete.  
 Fuente: <http://es.wikipedia.org>

Hoy en día, casi todas las instalaciones de fontanería están preparadas mediante diversos sistemas para evitar este fenómeno, ya que por lo general es dañino para las tuberías. Pero como podrán comprobar con la bomba de ariete, es posible aprovechar estas variaciones bruscas de presión.



### 2.2.2 ¿Qué es una bomba de ariete?

Una bomba de ariete es una máquina hidráulica desprovista de motor, capaz de aprovechar la energía potencial que posee una cantidad de fluido gracias a la sobrepresión producida por el fenómeno del golpe de ariete, para elevar una parte de ese fluido a una altura considerablemente mayor.

### 2.2.3 Partes de una instalación de bomba de ariete

El esquema básico de una instalación de bomba de ariete consta de varias partes diferenciadas:

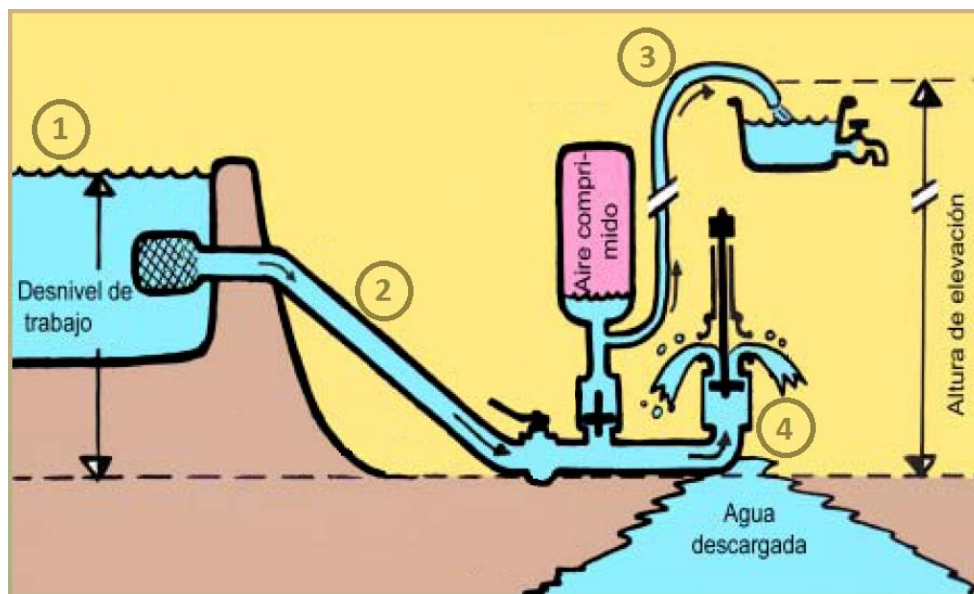


Figura 2-7 - Esquema de una instalación de bomba de ariete.

Fuente: [www.terra.org](http://www.terra.org)

#### 2.2.3.1 Fuente de alimentación (1)

Fuente continua de agua, que normalmente será un río al que le será devuelta unos metros más abajo el agua descargada por la bomba de ariete. También puede tratarse de un depósito suficientemente grande, normalmente fabricado de plástico u hormigón. Esta fuente tendrá que proporcionar agua a una altura  $H$  por encima del nivel al que se encuentre la bomba de ariete. Esta altura  $H$  depende del tipo de bomba con el que se trabaje, así como la altura final a la que se quiera bombear agua y el rendimiento que busquemos, pero un valor usual puede ser entre 2 y 5 metros.

#### 2.2.3.2 Tubería de alimentación (2)

Tubería larga y rígida que une el depósito de alimentación con la bomba de ariete. Por esta tubería el fluido se va acelerando para llegar a la bomba de ariete con cierta velocidad. Por esta tubería se propagarán además varias ondas de choque, por lo que ha de ser resistente y debe estar bien fijada. Es aconsejable que tenga la menor cantidad de codos, estrechamientos

e imperfecciones posibles. Conviene también que disponga de un filtro en el extremo de la fuente de alimentación, para impedir que posibles partículas de determinado tamaño pasen por ella y puedan llegar a la bomba de ariete.

### 2.2.3.3 Tubería de salida o de elevación (3)

Tubería más estrecha que la de alimentación, por la que el agua se elevará hasta la altura deseada,  $h$ . No se verá sometida a incrementos demasiado bruscos de presión, por lo que el material más comúnmente utilizado es el plástico. Alturas frecuentes de elevación son en torno a 4 o 6 veces la altura de alimentación ( $H$ ).

### 2.2.3.4 Bomba de ariete (4)

Pieza más importante y que estudiaremos más detalladamente. Recoge el agua que le llega por la tubería de alimentación y consigue elevar una parte de ella por la tubería de salida o elevación, a costa del resto, que deja fluir al exterior.

A su vez se compone de distintas piezas o partes:

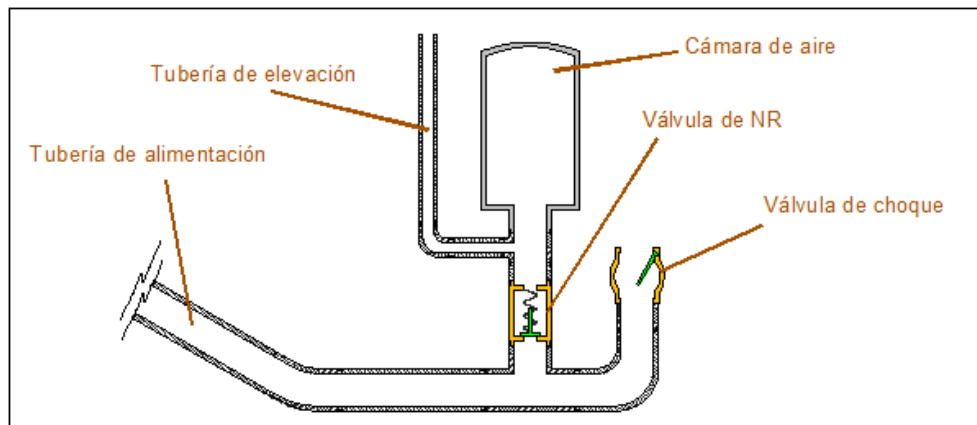


Figura 2-8 - Esquema de una bomba de ariete con cada uno de sus componentes principales.  
Fuente: Elaboración propia (AutoCAD)

#### 2.2.3.4.1 Válvula de NR (No Retorno).

También llamada anti-retorno, es una válvula que sólo permite el paso de fluido en uno de los dos sentidos. Esta válvula comunica la caja de válvulas con la tubería de elevación, y su función es abrirse sólo cuando la presión en la bomba sea grande, de forma que en ese momento el agua se eleve por la tubería de elevación, pero cerrarse cuando la presión sea inferior en la bomba que en la tubería de elevación, de forma que el agua no pueda volver aguas arriba de la válvula.

Lo más común es que se trate de una válvula anti-retorno de obturador ascendente con resorte, aunque también puede utilizarse una válvula anti-retorno de bola.

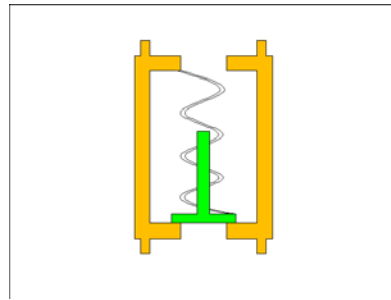


Figura 2-9 - Válvula de NR y esquema simplificado de la misma

#### 2.2.3.4.2 Válvula de choque.

Esta válvula comunicará el resto de la bomba de ariete con el exterior, y su función será dejar salir el agua al exterior durante unos instantes, de forma que la columna de agua se vaya acelerando a lo largo de toda la tubería de alimentación, y pasados estos instantes, cerrarse lo más rápidamente posible para detener el fluido de golpe y dar lugar a una fuerte sobrepresión.

Esta válvula puede encontrarse de muchas y muy diferentes formas constructivas, pero quizá la más sencilla sea utilizando una válvula anti-retorno dada la vuelta, de forma que no deje pasar más de un determinado caudal a su través, y se abra más tarde, debido a su propio peso o a la suma de su peso más un contrapeso adicional.

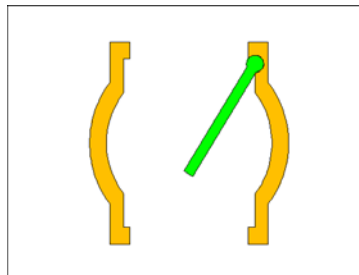


Figura 2-10 - Válvula de choque y esquema simplificado de la misma

#### 2.2.3.4.3 Caja de válvulas.

Esta parte de la bomba es la zona de unión de la tubería de alimentación con las dos válvulas. En muchos casos no es una caja propiamente dicha, sino que pueden ser varias piezas de unión, incluso el final de la misma tubería de alimentación, pero conviene diferenciarla, ya que los procesos que se llevan a cabo en esta zona no son los mismos que los de ninguna otra parte.

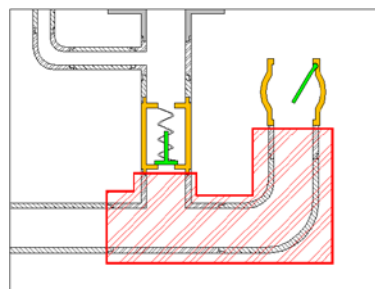


Figura 2-11 - Esquema simplificado de la caja de válvulas

#### 2.2.3.4.4 Cámara de aire o pulmón.

Es un pequeño depósito (vaso de expansión) que debe haber inmediatamente después de la válvula de NR, y antes de la tubería de elevación, que contendrá un colchón de aire. Este aire tendrá la función de absorber de forma continuada los golpes y las sobrepresiones a las que se verá sometido en instantes puntuales, y de liberar esa energía progresivamente durante el resto del ciclo al fluido, el cual se verá ayudado a ser impulsado por la tubería de elevación. Es una forma de amortiguar los golpes y de proporcionar un caudal de salida más constante.

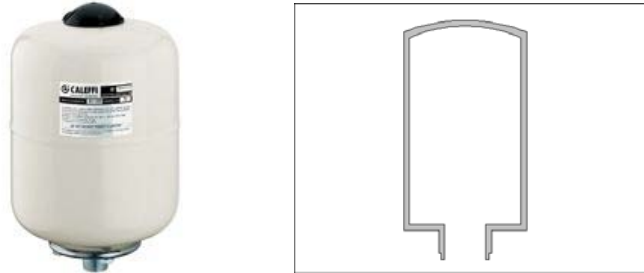


Figura 2-12 - Cámara de aire y esquema simplificado de la misma

#### 2.2.4 Explicación básica del funcionamiento de la bomba de ariete

Para entender el funcionamiento básico de la bomba de ariete, vamos a centrarnos en explicar el proceso que se llevará a cabo una y otra vez de forma ininterrumpida:

En primer lugar, encontrándose la válvula de choque abierta, comienza a bajar agua desde el depósito de alimentación por la tubería de alimentación, hasta que llega a la caja de válvulas y sale por la válvula de choque:

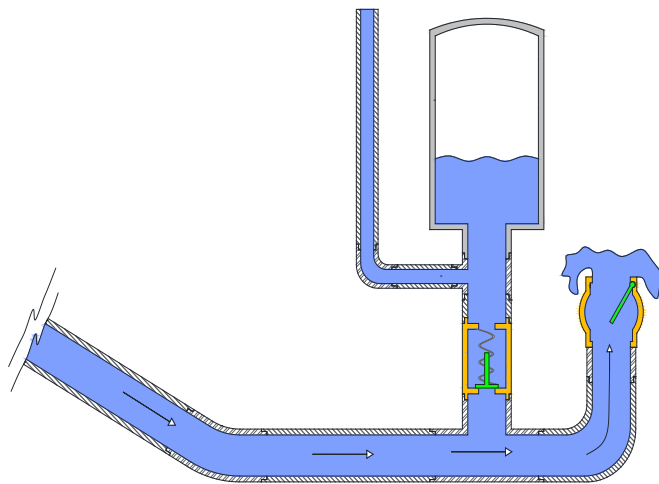
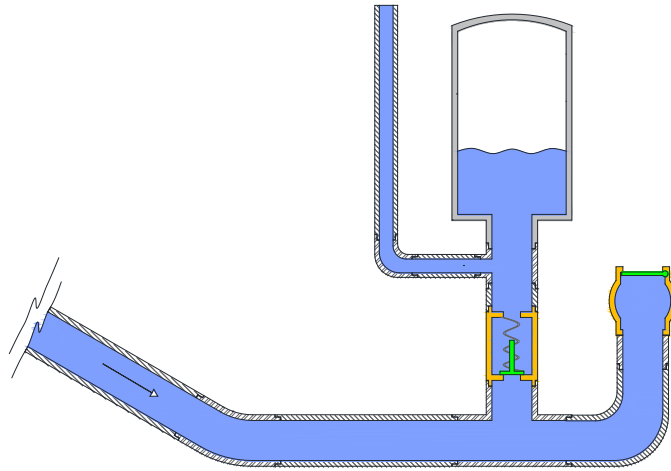


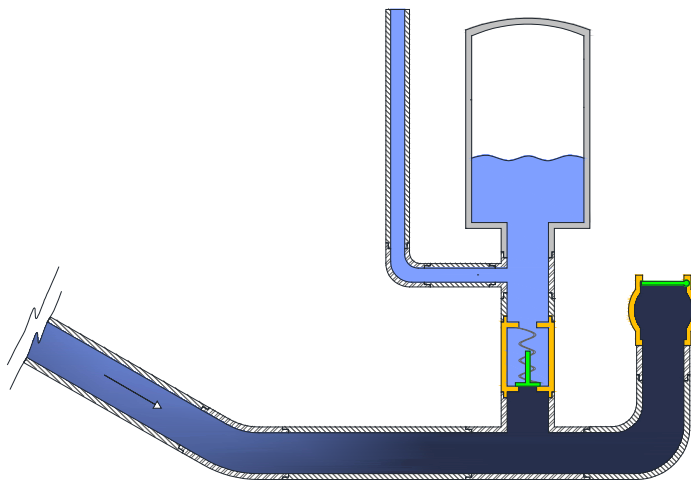
Figura 2-13 – Esquema 1: El agua sale al exterior por la válvula de choque.  
Fuente: Elaboración propia (AutoCAD)

A medida que se acelera el agua, aumenta la fuerza de arrastre que ésta ejerce sobre la clapeta de la válvula de choque, hasta que es suficiente para cerrarla de golpe:



**Figura 2-14 – Esquema 2: La fuerza de arrastre del agua provoca que la válvula de choque se cierre de golpe.**  
**Fuente: Elaboración propia (AutoCAD)**

Al cerrarse bruscamente la válvula de choque, la columna de agua que se traslada por la tubería de alimentación aún posee una gran energía cinética. Esta energía cinética se disipa a costa de aumentar repentinamente la presión en la caja de válvulas:



**Figura 2-15- Esquema 3: Se produce un ‘golpe de ariete’ y aumenta mucho la presión del fluido.**  
**Fuente: Elaboración propia (AutoCAD)**

Al tener la caja de válvulas una gran presión, permite la apertura de la válvula de NR y el paso de agua desde la caja de válvulas hacia la cámara de aire y a través de la tubería de elevación:

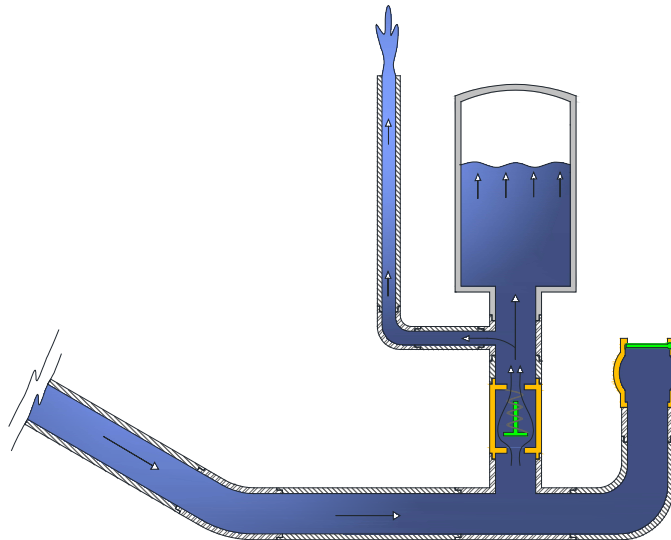


Figura 2-16 - Esquema 4: La válvula de NR se abre y permite el paso de agua hacia el pulmón y la tubería de elevación. Fuente: Elaboración propia (AutoCAD)

Cuando se igualan las presiones a uno y otro lado de la válvula de NR, ésta se cierra cortando el paso del fluido, y la presión que se ha acumulado en el aire de la cámara es transmitida al fluido, que es elevado por la tubería de salida o de elevación:

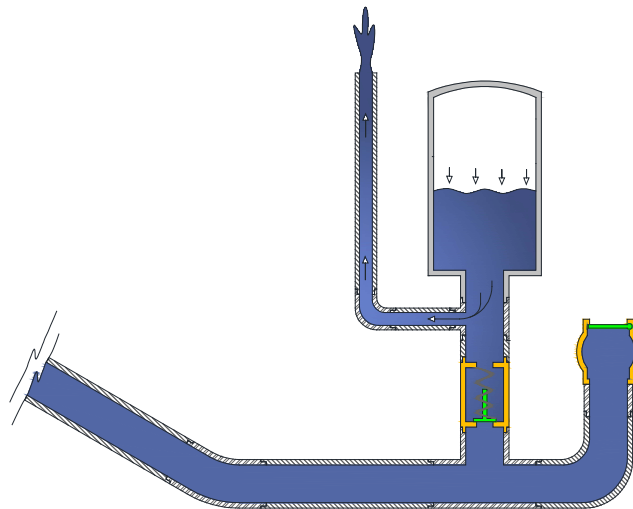


Figura 2-17 - Esquema 5: e cierra la válvula de choque y se va liberando la presión almacenada en el pulmón. Fuente: Elaboración propia (AutoCAD)

Pasados unos instantes, la presión en la caja de válvulas sigue disminuyendo, hasta que la clapeta de la válvula de choque se abre debido a su propio peso, y comienza a salir de nuevo agua por ella:

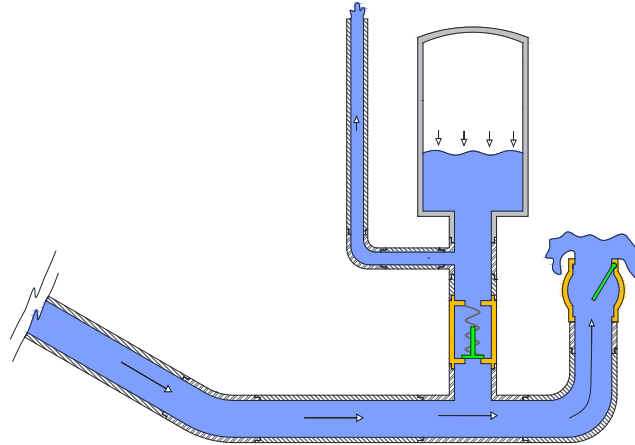


Figura 2-18 - Esquema 6: La válvula de choque se abre y comienza de nuevo todo el proceso.  
Fuente: Elaboración propia (AutoCAD)

De esta forma, volvemos a encontrarnos en la misma situación que al principio del proceso, repitiéndose este una y otra vez de forma continuada hasta que sea interrumpida voluntariamente, cerrando una llave de paso.

### 2.2.5 Algunos tipos constructivos de bombas de ariete

A lo largo de la historia de la bomba de ariete, los constructores de estas han variado algunos aspectos constructivos con uno u otro objetivo, ya sea para adaptarla a un caudal de entrada mínimo (ariete de arroyuelo), para conseguir alturas de funcionamiento mayores, para hacerla más robusta... o simplemente por razones estéticas. Obviamente pueden cambiar ciertos aspectos de la bomba, pero el principio de funcionamiento seguirá siendo exactamente el mismo.

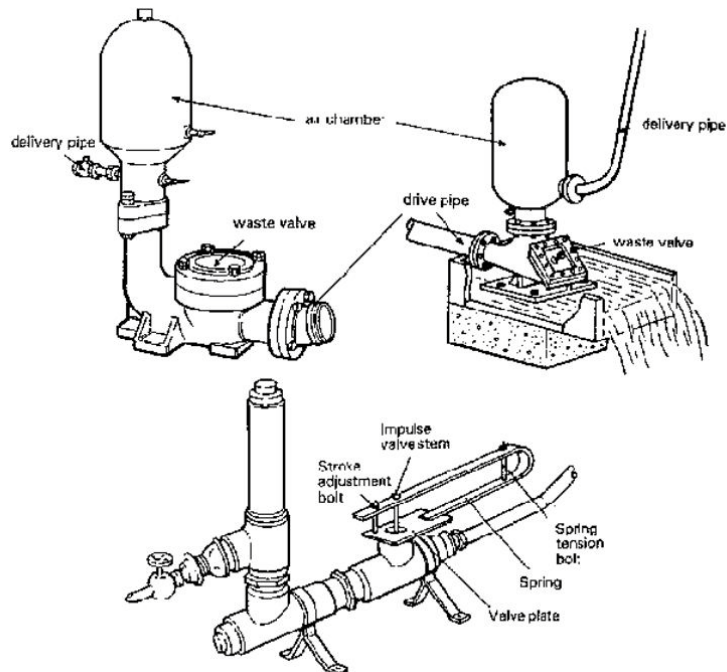


Figura 2-19 - Diferentes formas constructivas de bomba de ariete. Fuente: [www.fastonline.com](http://www.fastonline.com)

Las dos piezas que más frecuentemente varían de una bomba de ariete a otra, son la válvula de choque y el depósito de aire.

-La válvula de choque suele estar orientada hacia arriba, de forma que la gravedad ayude a la propia válvula a abrirse una vez se haya producido el cierre repentino. Sin embargo, pueden verse bombas en las que nos encontremos la válvula colocada horizontalmente, o incluso orientada hacia abajo, y dotada de un sistema de pesos o resortes que la ayuden a abrirse una vez cerrada. Estos pesos o resortes son de vital importancia si queremos dotar a nuestra bomba de un amplio rango de funcionamiento, ya que el peso de la válvula de choque definirá la velocidad que tendrá que llevar el agua para cerrarla, y esta velocidad al cierre influirá muchísimo en el funcionamiento de la bomba. De hecho, es común en muchas bombas de ariete que este parámetro pueda verse modificado, dotando a la bomba de versatilidad de funcionamiento.

-El depósito de aire también sufre variaciones de una construcción a otra, y además es común encontrar sistemas que garanticen que en el depósito siempre haya una cierta cantidad de aire, ya que la cantidad de aire normalmente se va reduciendo lentamente con el tiempo, debido a las minúsculas pérdidas, y a que una pequeña parte de este aire se disuelve en el agua que le rodea. Soluciones frecuentes suelen ser añadir junto a la válvula de NR una “válvula de purga de aire” (fig. 2.20) que gracias al efecto Venturi succiona del exterior una pequeña cantidad de aire cada vez que pasa fluido por la válvula de NR. Otra forma de asegurar que siempre haya aire en la cámara es introducir en ésta elementos estancos con aire, como pueden ser pelotas de tenis (Urkia [6]).



Figura 2-20 - Válvula de purga de aire acoplada a la válvula de NR

#### ***2.2.5.1 Bombas de ariete trabajando en serie y en paralelo***

Cuando la fuente de agua que se dispone es grande y caudalosa, puede encontrarse varias bombas de ariete trabajando a la vez, unidas a la misma tubería de elevación. Es lo que se conoce como una instalación de bombas de ariete conectadas en paralelo (figura 2.21).

De la misma forma, si se busca elevar agua a alturas muy elevadas (más de los 100 metros), puede resultar de utilidad que el agua elevada por una primera bomba de ariete sirva de alimentación para una segunda bomba de ariete, que eleve parte de esa agua a una altura aún mayor, lo cual presentaría un montaje en serie.





Figura 2-21 – Instalación de 6 bombas de ariete conectadas en paralelo. Fuente: [www.chinadalogue.net](http://www.chinadalogue.net)

### 2.2.5.2 *Ariete de aguas bravas*

Una variante muy interesante de la ingeniería del ariete es la del ariete de aguas bravas (fig. 2.22).

Corresponde en principio a dos arietes individuales montados uno sobre el otro y separados por una membrana de piel. Mientras que con el ariete inferior se utiliza agua motriz de un río, por ejemplo, con la membrana se puede aspirar y bombear agua potable salubre de una fuente o incluso un pozo.

Puesto que toma la energía del agua motriz, y no de la que eleva, el ariete de aguas bravas se puede comparar con un grupo motobomba de tipo convencional, que requiere otra energía para derivar su capacidad de bombeo.

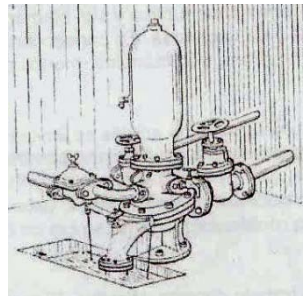


Figura 2-22 – Ariete de aguas bravas. Fuente: 'El ariete hidráulico' [5]

### **3 MODELO TEÓRICO**

En este capítulo estudiaremos los procesos fluidotérmicos que tienen lugar en una instalación de bomba de ariete en pleno funcionamiento, de manera que mediante las ecuaciones teóricas que conocemos de la mecánica de fluidos intentaremos modelizar su funcionamiento, y definir un sistema de ecuaciones que expliquen estos procesos.

#### **3.1 División en fases**

En primer lugar, para realizar el análisis del funcionamiento de la bomba, procederemos al análisis completo de un ciclo, que será definido como la acción se repetirá una y otra vez a lo largo del tiempo que tengamos la bomba en funcionamiento.

Para llevarlo a cabo, hemos dividido cada ciclo en seis fases diferentes, en cada una de las cuales nos encontraremos con un problema diferente y aislado, y para cuya resolución asumiremos ciertas hipótesis, dependiendo de en cuál de ellos nos encontremos.

Las fases en las que se ha dividido cada ciclo son las siguientes:

**-Fase 1:** Esta primera fase se inicia cuando la clapeta de la válvula de choque comienza a cerrarse por la inercia del agua que pasa por esta, y termina cuando se cierra completamente.

**-Fase 2:** Esta fase comienza cuando la válvula de choque se ha cerrado completamente y termina cuando se abre la válvula de no retorno (NR). Analizaremos el repentino aumento de la presión en el interior de la tubería debido a la formación de la primera onda de choque. Esta fase es muy breve, pero no por ello poco importante.

**- Fase 3:** Esta fase comprende el tiempo durante el cual la válvula de no retorno (NR) permanece abierta, permitiendo al fluido ascender por el conducto de salida. La presión en el interior de la bomba es muy grande cuando comienza esta fase, disipándose a medida que transcurre el tiempo.

**-Fase 4:** Breve fase que comienza cuando se cierra la válvula de NR debido a que la presión en el interior de la bomba ya no es suficientemente grande para mantenerla abierta. Esta fase se alarga hasta que la válvula de choque se abra debido a su propio peso y a la baja presión en el interior de la bomba.

**-Fase 5:** Esta fase comprende el periodo desde que se abre la válvula de choque hasta que comienza a salir agua por ella. También es una de las fases más temporalmente cortas.

**-Fase 6:** Esta fase, que cierra el ciclo, inicia en el momento que comienza a salir de nuevo el fluido por la válvula de choque (abierta). Según avanza la fase, el fluido va adquiriendo velocidad, fuerza e inercia. Esta fase termina cuando la fuerza que ejerce el fluido en movimiento sobre la válvula de choque es suficiente para comenzar a moverla, tras lo que comenzaría de nuevo la primera fase.

Una vez definidas las fases de un ciclo completo, pasamos a analizar cada una de ellas por separado, ya que en cada caso nos enfrentaremos a un problema diferente.

### 3.2 Nomenclatura del análisis realizado

Símbolo	Unidades	Definición
v	m/s	velocidad del fluido en la tubería de alimentación
t	s	tiempo
K	m/s <sup>3</sup>	variación de la aceleración del fluido en la tubería de alimentación en la fase 1, tomada como constante
C <sub>1</sub>	-	Constante de integración
C <sub>2</sub>	-	Constante de integración
v <sub>0</sub>	m/s	velocidad del fluido en la tubería de alimentación en el comienzo de la fase 1
α <sub>6</sub>	m/s <sup>2</sup>	aceleración del fluido en la tubería de alimentación al final de la fase 6
t <sub>1</sub>	s	duración del periodo 1
v <sub>1</sub>	m/s	velocidad del fluido en la tubería de alimentación al final de la fase 1

Símbolo	Unidades	Definición
s	m	desplazamiento de la clapeta de la válvula de choque desde su posición cerrada
J	m/s <sup>2</sup>	aceleración de la clapeta de la válvula de choque en la fase 1, tomada como constante
s <sub>0</sub>	m	desplazamiento máximo de la clapeta de la válvula de choque desde su posición cerrada
Q <sub>1</sub>	l/ciclo	Cantidad de agua que fluye al exterior durante el periodo 1
ρ	kg/m <sup>3</sup>	densidad del fluido de trabajo
A	m <sup>2</sup>	sección de la tubería de alimentación
P	Pa	presión
c	m/s	velocidad de propagación de una onda de choque en un fluido
P <sub>atm</sub>	Pa	Presión atmosférica
H	m	altura de alimentación
(ΔP)'	Pa	variación de presión del fluido tras el paso de la onda 1'
(ΔP)''	Pa	variación de presión del fluido tras el paso de la onda 1''
(ΔP) <sub>1</sub>	Pa	variación de presión del fluido tras el paso de la onda 1
(Δv)'	m/s	variación de velocidad del fluido tras el paso de la onda 1'
(Δv)''	m/s	variación de velocidad del fluido tras el paso de la onda 1''
(Δv) <sub>1</sub>	m/s	variación de velocidad del fluido tras el paso de la onda 1
v <sub>2</sub>	m/s	velocidad del fluido en la tubería de alimentación al final de la fase 2
g	m/s <sup>2</sup>	aceleración de la gravedad
h'	m	cota piezométrica en la caja de válvulas necesaria para abrir la válvula de NR
h	m	altura de elevación
h' <sub>0</sub>	m	variación de cota piezométrica en la caja de válvulas tras el paso de la onda de choque 1
m	(adim.)	coeficiente de pérdidas por fricción en la válvula de NR
t <sub>2</sub>	s	duración del periodo 2
L	m	Longitud de la tubería de alimentación, desde el depósito de alimentación hasta la válvula de choque
L <sub>1</sub>	m	Longitud de la tubería de alimentación, desde el depósito de alimentación hasta la válvula de NR
(ΔP) <sub>2</sub>	Pa	variación de presión del fluido tras el paso de la onda 2
(Δv) <sub>2</sub>	m/s	variación de velocidad del fluido tras el paso de la onda 2
h'' <sub>0</sub>	m	variación de cota piezométrica en la caja de válvulas tras el paso de la onda de choque 1
(Δv) <sub>N</sub>	m/s	variación de velocidad del fluido tras el paso de la onda N
$\overline{(\Delta P)}$	Pa	variación media de presión del fluido tras el paso de una onda de choque
$\overline{(\Delta v)}$	m/s	variación media de velocidad del fluido tras el paso de una onda de choque
N	-	número de ondas(de ida y vuelta) que se producen durante la fase 3

<b>Símbolo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Definición</b>
$t_r$	s	tiempo que tarda en disiparse $v_r$
$v_r$	m/s	velocidad restante en la tubería de alimentación en la fase 3 tras el paso de N ondas de choque
$t_3$	s	duración del periodo 3
$q_s$	l/ciclo	caudal de elevación
$q_3$	l/ciclo	cantidad de agua elevada durante la fase 3
$v_3$	m/s	velocidad del fluido en la tubería de alimentación al final de la fase 3
$v_4$	m/s	velocidad del fluido en la tubería de alimentación al final de la fase 4
$t_4$	s	duración del periodo 4
$t_5$	s	duración del periodo 5
$v_5$	m/s	velocidad del fluido en la tubería de alimentación al final de la fase 5
f	(adim.)	coeficiente de pérdidas por fricción en la tubería de alimentación
j	(adim.)	Factor de pérdidas por fricción
$t_6$	s	duración del periodo 6
$v_6$	m/s	velocidad del fluido en la tubería de alimentación al final de la fase 6
$Q_6$	l/ciclo	Cantidad de agua que fluye al exterior durante el periodo 6
$t_{ciclo}$	s	duración de un ciclo completo
$q_{elevada}$	l/min	caudal de agua elevada
$Q_{gastada}$	l/min	caudal de agua gastada
$Q_{ciclo}$	l/ciclo	Cantidad de agua gastada durante un ciclo completo
$q_{ciclo}$	l	Cantidad de agua elevada durante un ciclo completo
Rend	%	rendimiento de la bomba de ariete
$\epsilon$	N/m <sup>2</sup>	módulo de elasticidad volumétrica del fluido de trabajo
E	N/m <sup>2</sup>	módulo de elasticidad del material de la tubería de alimentación
r	m	radio de la tubería de alimentación
e	m	espesor de la tubería de alimentación
$\bar{c}$	m/s	velocidad de propagación media de una onda de choque en un fluido para tuberías de más de un material
l	m	longitud total de la tubería a tratar
$l_i$	m	longitud de cada uno de los tramos de la tubería a tratar
$c_i$	m/s	velocidad de propagación de una onda de choque en cada uno de los tramos de la tubería a tratar

### 3.3 Análisis y resolución de cada una de las fases:

#### 3.3.1 FASE 1

Para esta fase, varios autores (como O'Brien y J. E. Gosline [10]) se propusieron hacer un estudio analítico completamente teórico, pero sin mucho éxito (debido a que los resultados obtenidos sólo mediante teoría eran muy variables, poco precisos y no demasiado relevantes), por lo que las ecuaciones que proponemos han sido obtenidas a raíz del análisis de resultados experimentales de W.M. Lansford [9].

En los análisis de las propiedades del fluido durante este periodo en la tubería de alimentación, llevados a cabo W.M. Lansford [9], el autor pudo observar que la presión en la tubería se mantiene prácticamente constante hasta el momento en el que la válvula está casi totalmente cerrada. Sin embargo, en este análisis, tendremos en cuenta las pérdidas de carga primaria, las cuales van aumentando a medida que la sección de salida disminuye, regulada por la válvula de choque en movimiento. En esta fase, por lo tanto, y mientras la válvula de choque va cerrándose, podremos asumir que la aceleración del agua en la tubería de alimentación durante este periodo disminuye con un valor constante:

$$\frac{d^2v}{dt^2} = -K \quad (\text{Ec. 1.1})$$

Si integramos la ecuación anterior dos veces, obtendremos tanto la ecuación de la aceleración (ec. 1.2) como la de la velocidad del fluido (ec. 1.3):

$$\frac{dv}{dt} = -Kt + C_1 \quad (\text{Ec. 1.2})$$

$$v = -\frac{Kt^2}{2} + C_1t + C_2 \quad (\text{Ec. 1.3})$$

Ahora bien, imponiendo como condiciones iniciales las conocidas para  $t = 0$ :  $v = v_0$  (que supondremos conocida) y  $\frac{dv}{dt} = \alpha_6$  (que hallaremos más adelante), y la condición de contorno para  $t = t_1$ :  $\frac{dv}{dt} = 0$ , podemos obtener los valores para las constantes  $K = \frac{\alpha_6}{t_1}$ ,  $C_1 = \alpha_6$  y  $C_2 = v_0$ . Con estos valores la ecuación de la velocidad en la tubería de alimentación para cualquier instante de esta primera fase (ec. X.1.3) nos quedaría como sigue:

$$v = -\frac{\alpha_6}{2t_1}t^2 + \alpha_6t + v_0 \quad (\text{Ec. 1.4})$$

Ecuación a la cual, particularizándola para el caso  $t = t_1$ :  $v = v_1$ , obtenemos el valor de la velocidad al final de la fase 1 y comienzo de la fase 2 :

$$v_1 = v_0 + \frac{\alpha_6 t_1}{2} \quad (\text{Ec. 1.5})$$

Varios experimentos realizados con cámaras de alta velocidad por W. M. Lansford y W. G. Dugan, en la Universidad de Illinois [9], sugieren que la aceleración que adquiere la válvula de choque durante este periodo puede ser aproximada también a una constante, esto es,

$$\frac{d^2s}{dt^2} = -J \quad (\text{Ec. 1.6})$$

De manera que imponiendo las condiciones iniciales que conocemos para  $t = t_0$ :  $\frac{ds}{dt} = 0$  y  $s = s_0$ , y para  $t = t_1$ :  $s = 0$  obtenemos:

$$t_1 = \sqrt{\frac{2s_0}{J}} \quad (\text{Ec. 1.7})$$

Siendo:  $s_0$ : recorrido (carrera) de la válvula de choque

$J$ : constante a determinar con ensayos.

Los resultados experimentales anteriormente mencionados sugieren además que el valor de  $J$  puede ser aproximado, sin caer en errores importantes, a un valor de 2, con lo que consecuentemente podremos hacernos una idea del valor de  $t_1$ :

$$t_1 = \sqrt{\frac{2s_0}{J}} \quad (\text{Ec. 1.8})$$

Durante esta primera fase, dado que se ha de cumplir la ley de conservación de la masa, el agua que fluye por cualquier sección de la tubería de alimentación, es la misma cantidad de agua que saldrá por la válvula de choque durante esta fase, es decir, la cantidad de agua "gastada". Esta cantidad puede ser calculada integrando el caudal de agua que atraviesa una sección de la tubería de alimentación, de sección  $A$  conocida, dado que ya sabemos el valor que tendrá la velocidad del fluido en la tubería de alimentación durante esta primera fase (ec. 1.4). La cantidad de agua gastada por tanto, nos queda:

$$Q_1 = \int_0^{t_1} \rho A v dt = \rho A \left( v_0 t_1 + \frac{\alpha_6 t_1^2}{2} \right) \quad (\text{Ec. 1.9})$$

### 3.3.2

## FASE 2

En esta fase es en la que se produce el primer golpe de ariete en el interior de la bomba al cerrarse bruscamente la válvula de choque, ya que este repentino cierre obliga al fluido que se desplazaba con una velocidad  $v_1$ , a detenerse completamente. La fuerza de inercia que posee la columna de agua que viene desplazándose con esa misma velocidad  $v_1$  por la tubería de alimentación, es la que origina una enorme sobrepresión en el extremo de la válvula de choque, que se irá transmitiendo aguas arriba, junto con la disminución de velocidad mencionada, mediante una onda de choque. Estos dos procesos (el aumento de la presión y la disminución de la velocidad), están relacionados por la ecuación de Joukowski, obtenida a partir de la teoría clásica de las ondas de choque (ver por ejemplo 'Mecánica de fluidos'-cap. 23-, de A. Crespo [4]):

$$\Delta v = -\frac{\Delta P}{\rho c} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

El valor del aumento de velocidad que lleva asociado esta onda de choque será de  $-v_1$ , ya que el fluido que la onda de choque se va encontrando posee una velocidad  $v_1$ , y tras el paso de la onda, el fluido se queda con una velocidad 0, esto es, completamente parado. Teniendo esto claro, no nos será complicado calcular el incremento de presión que vendrá asociado a este golpe de ariete:

$$(\Delta P)' = -\rho \cdot c \cdot (\Delta v)' = -(\rho \cdot c \cdot 0 - \rho \cdot c \cdot v_1) = \rho \cdot c \cdot v_1 \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Cuando esta onda de choque comience a retroceder aguas arriba, no tardará mucho en encontrarse con la válvula de NR, válvula que inmediatamente después del paso de la onda de choque, se abrirá (ver figuras 3.1 a) y b)), ya que la presión en el extremo inferior ( $= P_{\text{atm}} + \rho gH + \rho c v_1$ ) será sustancialmente más grande que la presión en el extremo superior ( $= P_{\text{atm}} + \rho gH$ ). No sólo eso, sino que además, dado el enorme gradiente de presión a uno y otro lado de esta válvula, en el momento en que se abra, se generará una segunda onda de choque que partirá desde la válvula de NR hacia el depósito de alimentación, y recorrerá la tubería de alimentación inmediatamente después de la primera onda y acompañándola a muy poca distancia. Esta onda de choque se encontrará con un fluido en reposo a una alta presión, y tras de sí lo dejará con algo menos de presión, y una velocidad  $v_2$ , positiva (es decir, hacia la bomba de ariete), pero menor que la que tenía inicialmente ( $v_1$ ).

Las variaciones de presión y la de velocidad provocadas por esta onda de choque secundaria también pueden ser cuantificadas mediante la ecuación de Joukowski (ec. 2.1) de las ondas de choque, sabiendo que la velocidad final tras el paso de esta será  $v_2$ , que de momento supondremos conocida:

$$(\Delta P)'' = -\rho \cdot c \cdot (\Delta v)'' = -(\rho \cdot c \cdot v_2 - \rho \cdot c \cdot 0) = \rho \cdot c \cdot (-v_2) \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Estas dos primeras ondas de choque viajan prácticamente al mismo tiempo aguas arriba por la tubería de alimentación. De hecho, podemos (y así lo vamos hacer) simplificar algo el problema interpretándolas como una sola onda de choque, que produce un cambio de presión igual la suma del producido por las 2 ondas que realmente se han producido:

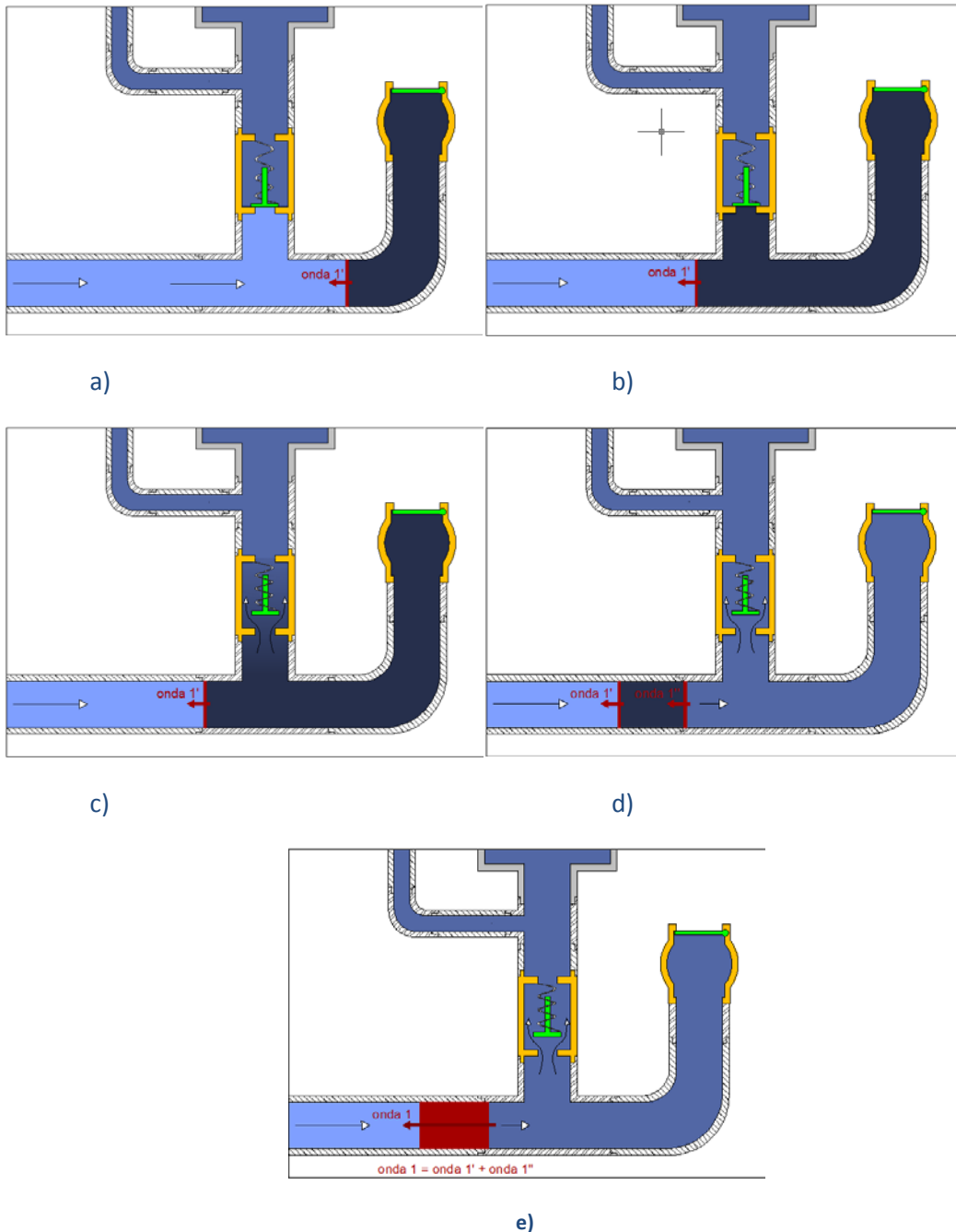
$$(\Delta P)_1 = (\Delta P)' + (\Delta P)'' = \rho \cdot c \cdot (v_1 - v_2) \quad (\text{Ec. 2.4})$$



De la misma manera, la disminución de velocidad que vendrá asociada a esta onda de choque será igualmente la suma de las 2 ondas reales.

$$(\Delta v)_1 = (\Delta v)' + (\Delta v)'' = v_1 - v_2 \quad (\text{Ec. 2.5})$$

A partir de la fase 3 en adelante, interpretaremos siempre estas 2 ondas simultáneas como una sola (Fig. 3.1 e ).



**Figura 3-1 - Esquema de la generación de las ondas de choque 1' y 1'', y su simplificación a una sola onda.**  
Fuente: Elaboración propia (AutoCAD)

Por otro lado, sabemos que al final de esta fase 2 (inmediatamente después de abrirse la válvula de NR), tendremos una presión en el extremo inferior de la válvula de NR que será la suficiente para mantenerla abierta, estando la bomba en funcionamiento (es decir, con un

nivel de agua  $h$  al otro lado de la válvula), esto es, tendremos una presión  $P = \rho gh'$ , siendo  $h'$  la altura de agua equivalente necesaria para que se abra la válvula NR (la cual será mayor que  $h$ ).

Por lo tanto, la variación de presión que transmitirá esta primera onda de choque se puede también expresar como

$$(\Delta P)_1 = \rho g(h' - H) \quad (\text{Ec. 2.6})$$

y la disminución de velocidad asociada, por la ecuación

$$(\Delta v)_1 = \frac{(h' - H)g}{c} = \frac{h'_0 g}{c} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Definiendo  $h'_0 = (h' - H)$ , tendremos la ecuación que nos proporcionará la velocidad en la tubería de alimentación al finalizar esta fase 2, esto es,  $v_2$ :

$$v_2 = v_1 - \frac{h'_0 g}{c} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Para hallar el valor de  $h'_0$ , no hay más que tener en cuenta las alturas de funcionamiento de la bomba de ariete con las que trabajemos y las pérdidas de la válvula de NR:

$$h'_0 = h - H + \frac{mv_2}{2g} = h - H + \frac{m(v_1 - (\Delta v)_1)}{2g} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Siendo  $m$  la constante de pérdidas por fricción en la válvula de NR.

Habiendo calculado el valor de  $h'_0$  (ec. 2.9), y con él el de  $v_2$  (ec. 2.8), ya podemos obtener mediante las ecuaciones 2.4 y 2.5 el valor de los incrementos de presión y de velocidad que serán provocados por esta onda de choque que se propaga aguas arriba por el depósito de alimentación.

Para hallar la duración de la fase 2 (recordemos que esta fase sólo comprende desde que se forma la primera onda de choque en la válvula de choque hasta que llega a la válvula de NR), nos bastará con hacer un cálculo sencillo, ya que conocemos tanto la distancia entre las válvulas ( $L - L_1$ ) como la velocidad a la que se propaga la onda ( $c$ ). La duración de esta fase es muy leve y prácticamente despreciable frente a la del resto del ciclo (ya que  $\ll L - L_1$ ), pero los procesos que se llevan a cabo en ella creo que son dignos de mención. La ecuación que nos proporcionaría por tanto la duración de esta fase sería:

$$t_2 = \frac{L - L_1}{c} \sim 0 \quad (\text{Ec. 2.10})$$

En los cálculos realizados en este apartado, hemos despreciado las pérdidas de presión debido a la fricción en la tubería de alimentación, ya que no son importantes comparadas con las variaciones de presión debidas a la onda de choque.

### 3.3.3 FASE 3

En el análisis de esta fase, tendremos en cuenta que la distancia entre la válvula de choque y la válvula de NR es despreciable frente a la longitud de la tubería de alimentación ( $L-L_1 \ll L$ ). También despreciaremos las pérdidas por fricción, ya que al igual que en la fase anterior, no son importantes frente a las variaciones de presión provocadas por las ondas de choque.

Durante esta fase, la onda de choque generada en la fase anterior se propaga aguas arriba por la tubería de alimentación, provocando a su paso una disminución de velocidad que ya hemos calculado,

$$(\Delta v)_1 = \frac{h'_0 g}{c} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

y un aumento de presión

$$(\Delta P)_1 = \rho g h'_0 . \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Cuando esta onda haya recorrido en su totalidad la tubería de alimentación y llegue al depósito de alimentación (en un tiempo  $L_1/c$  desde el comienzo de la fase 3), desaparecerá y nos encontraremos por un momento ante un gran desequilibrio de presión, ya que la presión en la tubería ahora será mayor que la que hay en el depósito. Este desequilibrio provocará una segunda onda de choque de la misma magnitud que la primera, pero en dirección contraria, volviendo de nuevo por la tubería de alimentación hacia la válvula de choque. Esta segunda onda de choque provoca una disminución de la presión (volviendo el fluido dentro de tubería de entrada a su presión inicial), y una nueva reducción de la velocidad, por lo que el fluido que deje tras de sí tendrá ahora una velocidad

$$v_1 - 2(\Delta v)_1. \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Cuando esta segunda onda de choque alcanza a la válvula de choque (pasado un tiempo  $2L_1/c$  desde que comenzara esta fase 3), la presión del fluido en la válvula de NR habrá disminuido hasta la inicial, cerrándola por un instante, y provocando una situación similar a la inicial de la fase 2 (la columna de fluido de la tubería de alimentación se desplaza con cierta velocidad hacia la válvula de choque pero esta se encuentra cerrada) por lo que se repetirá el proceso (fases 2 y 3) de nuevo, pero esta vez con una onda de choque más débil, debido tanto a que la velocidad que tiene ahora el agua de la tubería de alimentación es menor, como a las pérdidas que ha ido teniendo la onda de choque a lo largo de los dos pasos por la tubería de alimentación, por lo que el nuevo cambio de presión

$$(\Delta P)_2 = \rho g (h_0'') = h - H + \frac{m(v_1 - 2(\Delta v)_1 - (\Delta v)_2)}{2g} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

será menor que el anterior.

Este proceso de ida y vuelta se repetirá N veces, cada vez con una onda más débil, hasta que la última onda (la número N), genere una disminución de velocidad de tan solo

$$(\Delta v)_N \approx \frac{(h-H)g}{c} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Para simplificar esta fase en la medida de lo posible, asumiremos que todas las ondas que se generan llevan consigo la misma variación de presión (la calcularemos como la media de la primera variación de presión y la última), y por lo tanto también la misma disminución de velocidad. Por tanto, daremos por válida la teoría de que cada onda lleva consigo una disminución de presión:

$$\overline{\Delta P} = \rho g \left( h - H + \frac{m(v_1 - \Delta v)}{4g} \right) \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Y una variación de velocidad:

$$\overline{\Delta v} = \frac{g}{c} \left( h - H + \frac{m(v_1 - \Delta v)}{4g} \right) \quad (\text{Ec. 3.7})$$

Para aclarar y facilitar la comprensión de los procesos que tienen lugar en esta fase, representaremos a continuación frente al tiempo, la velocidad del agua en el extremo final de la tubería de alimentación durante las fases 2 y 3:

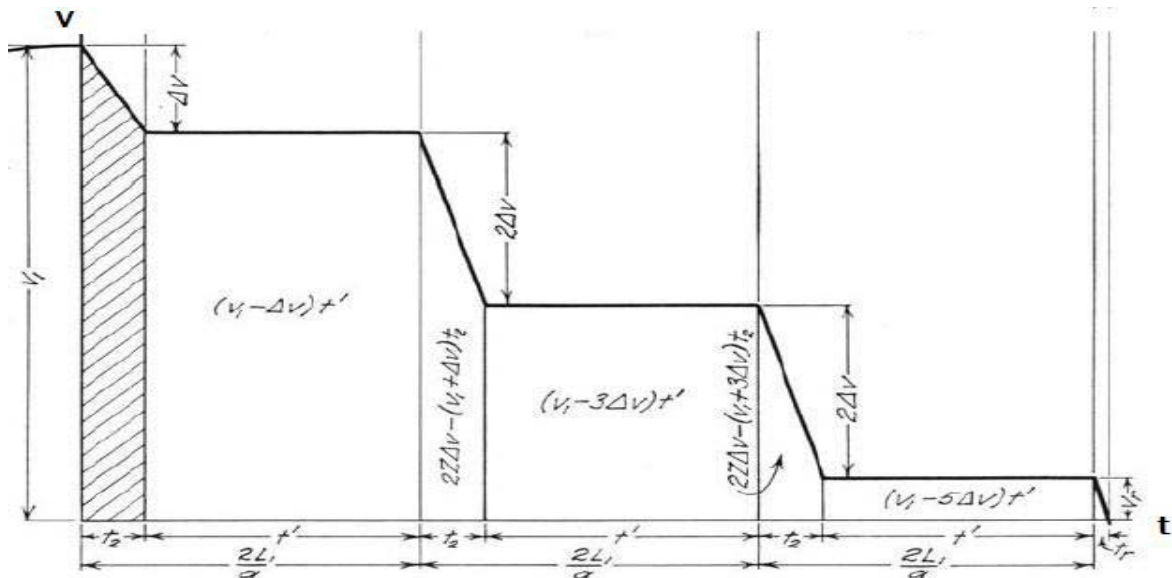


Fig. X.3.1 - Velocidad en la tubería de alimentación, en el extremo de la válvula de choque (caso de N=4)

Fuente: Landsford & Gosline (modificado)

Como podemos observar en el gráfico anterior, una vez que se han generado N-1 ondas de ida y vuelta, tendremos una velocidad restante  $V_r$ , menor que  $\overline{\Delta v}$ , y el tiempo que tardará en disiparse será  $t_r$ , menor que  $t_2$ .

Con los datos que tenemos, podemos decir que la variación media de velocidad será de:

$$\overline{\Delta v} = \frac{g}{c} \left( h - H + \frac{m(v_1 - \overline{\Delta v})}{4g} \right) = \frac{4g(h-H) + mv_1}{4a+m} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

Teniendo el valor de  $\overline{\Delta v}$  y de  $V_1$ , no será complicado sacar el número de veces que las ondas van y vuelven por la tubería de alimentación (N), ya que sabemos que es un número entero, y podemos acotarlo entre dos valores cuya diferencia es  $\leq 1$ :

$$\frac{v_1 - \overline{\Delta v}}{2\overline{\Delta v}} < N \leq \frac{v_1 + \overline{\Delta v}}{2\overline{\Delta v}} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

De la misma forma, sabemos que la pendiente (la aceleración negativa del fluido) es la misma para todos los “golpes” de la fase 3, por lo tanto,

$$t_r = t_2 \frac{v_r}{2\overline{\Delta v}} \sim 0 \quad (\text{Ec. 3.10})$$

De esta forma, podremos obtener la duración de la fase 3 como:

$$t_3 = \frac{2L_1}{a} N - t_2 + t_r = \frac{2L_1}{a} N \quad (\text{Ec. 3.11})$$

Durante toda esta fase, la válvula de NR estará abierta (exceptuando N-1 instantes despreciables de duración  $t_2$ ), mientras que la válvula de choque permanece cerrada, por lo que toda el agua que fluya por la tubería de alimentación pasará a través de la válvula de NR hacia la tubería de elevación.

Por lo tanto, podemos decir que el caudal de elevación vendrá determinado por el área bajo la curva de la figura (ec. 3.1), esto es:

$$\begin{aligned} q_{ciclo} &= q_3 = \int_0^{t_3} \rho \cdot A \cdot v \cdot dt = \rho \cdot A \int_0^{t_3} v \cdot dt = \\ &= \rho A \cdot \left\{ \frac{2L_1}{a} [(v_1 - \overline{\Delta v}) + (v_1 - 3\overline{\Delta v}) + (v_1 - 5\overline{\Delta v}) + \dots] \right\} = \\ &= \rho A \cdot \left\{ \frac{2L_1}{a} [Nv_1 - \overline{\Delta v}(1 + 3 + 5 + \dots)] \right\} = \\ &= \rho A \cdot \frac{2L_1}{a} (Nv_1 - \overline{\Delta v}N^2) \quad (\text{Ec. 3.12}) \end{aligned}$$

### 3.3.4 FASE 4

Cuando la última onda (la número N) vuelve por la tubería de alimentación hacia la válvula de choque, deja tras de sí (en el extremo de la tubería que da al depósito de alimentación) una velocidad del fluido ( $v_3$ ) cuyo valor estará entre  $\overline{\Delta v}$  y  $-\overline{\Delta v}$ . Dependiendo de si esta velocidad es positiva o negativa nos encontraremos en dos situaciones diferentes cuando esta onda se encuentre con la válvula de choque:

-Caso 1 ( $v_3 < 0$ ):

En este caso, cuando la última onda de la fase 3 se encuentre con la válvula de choque y cierre la válvula de NR, tendremos una velocidad negativa en todo el conducto de alimentación, la cual provocará una presión en el extremo de la válvula de choque menor que la atmosférica, lo cual sumado a el peso de la propia válvula hará que esta se abra, dando lugar instantáneamente a la fase 5.

-Caso 2 ( $v_3 > 0$ ):

En este otro caso, cuando la última onda cierre la válvula de NR y se encuentre con la válvula de choque, tendremos una velocidad del fluido en la tubería de alimentación positiva de valor  $v_3$ , por lo que se generará una nueva onda de choque similar a las anteriores, pero que en esta ocasión no será suficiente para abrir la válvula de NR, por lo que esta onda de choque se propagará aguas arriba dejando tras de sí la velocidad del fluido a cero y con una sobrepresión. Cuando esta onda llegue al depósito de alimentación, tendremos un desequilibrio de presiones (dado que la presión en la tubería será mayor que la que tiene el depósito), generándose una nueva onda de presión de la misma intensidad que la anterior, la cual dejará al fluido de la tubería de alimentación a la misma presión que el depósito pero con una velocidad negativa de valor  $-v_3$ , la cual, cuando llegue a la válvula de choque generará una presión menor que la atmosférica en el extremo de la válvula de choque, al igual que en el caso 1, la cual sumada al peso de la propia válvula provocará que esta se abra, dando paso a la fase 5.

Por lo tanto, el valor de la velocidad al final de la fase será:

$$\begin{aligned}v_4 &= v_3, \text{ si } v_3 < 0 \\v_4 &= -v_3, \text{ si } v_3 > 0\end{aligned}\tag{Ec. 4.1}$$

Es decir:

$$v_4 = |v_3|\tag{Ec. 4.2}$$

La duración de este periodo, como es fácil suponer, será diferente si nos encontramos en uno de los casos o en el otro.

De hecho, si nos encontráramos con el caso 1, no existiría este periodo, siendo  $t_4=0$ .

Sin embargo, si nos encontramos con el caso 2, no resulta complicado darse cuenta de que el tiempo que durará la fase será lo que tarde la onda en recorrer la tubería de alimentación 2

veces (una en cada sentido), por lo que podemos definir la duración de este periodo de la siguiente manera:

$$t_4 = 2 \frac{L_1}{a}, \text{ si } v_3 > 0$$

$$t_4 = 0, \text{ si } v_3 < 0$$

(Ec. 4.3)

### 3.3.5 FASE 5

Durante esta fase y la siguiente, despreciaremos las variaciones de presión en el fluido, ya que no serán significativas ( $\Delta P \ll P$ ), considerando el agua un líquido incompresible.

Al comienzo de esta fase, tendremos un fluido circulando por la tubería de alimentación con velocidad  $v_4$  negativa, y una altura de agua  $H$  que la hará cambiar de sentido rápidamente.

La aceleración a la que se ve sometida el fluido en este caso nos viene dado por la siguiente ecuación física:

$$\text{Aceleración} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Masa}} = \frac{dv}{dt} = \frac{\rho AH}{\frac{\rho A l}{g}} = \frac{Hg}{l} \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Operando con la cual podemos obtener el tiempo que tardará el fluido en pasar de una velocidad  $v_4$  a una velocidad  $v_5$ :

$$\int_0^{t_5} dt = \int_{v_4}^{v_5} \frac{L}{gH} dv \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$t_5 = \frac{L}{gH} (v_5 - v_4) \quad (\text{Ec. 5.3})$$

Y dado que las velocidades que estamos manejado en esta fase son muy pequeñas, podremos despreciar los efectos de la fricción sin que se vea alterado el resultado, por lo que podremos decir que:

$$v_5 = -v_4 \quad (\text{Ec. 5.4})$$

Y por lo tanto, mediante la ecuación (numero), podemos hallar la duración de esta fase 5:

$$t_5 = \frac{-2Lv_4}{gH} = \frac{2Lv_5}{gH} \quad (\text{Ec. 5.5})$$



### 3.3.6 FASE 6

En esta fase las velocidades serán mayores, por lo que ya no sería correcto despreciar las pérdidas por fricción.

Esta fase comprende desde el instante en el que comienza a salir agua por la válvula de choque hasta que la velocidad de la misma es suficiente como para comenzar a cerrar dicha válvula. Nos encontramos en esta fase ante un problema de caída libre de agua, por lo que aplicaremos continuidad a una partícula durante toda su trayectoria, teniendo en cuenta además de las pérdidas por rozamiento, el régimen transitorio (ver por ejemplo ‘Mecánica de fluidos’ -cap. 23-, de A. Crespo [4]):

$$\rho gH - \rho \frac{v^2}{2} - \rho \frac{fL}{D} \frac{v^2}{2} - \rho K \frac{v^2}{2} = \rho L \frac{dv}{dt} \quad (\text{Ec. 6.1})$$

Si denominamos  $j$  a el factor de pérdidas ( $= fL/D + K + 1$ ) y operamos con la ecuación anterior...

$$dt = \frac{\frac{2L}{j}}{\frac{2gH}{j} - v^2} dv \quad (\text{Ec. 6.2})$$

$$\int_0^{t_6} dt = \int_{v_5}^{v_6} \frac{\frac{2L}{j} dv}{\frac{2gH}{j} - v^2} \quad (\text{Ec. 6.3})$$

$$t_6 = \frac{L}{j \sqrt{\frac{2gH}{j}}} \log \left( \frac{\sqrt{\frac{2gH}{j} + v_6} / \sqrt{\frac{2gH}{j} - v_6}}{\sqrt{\frac{2gH}{j} + v_5} / \sqrt{\frac{2gH}{j} - v_5}} \right) \quad (\text{Ec. 6.4})$$

Y dado que por definición,  $v_6 = v_0$ :

$$t_6 = \frac{L}{j \sqrt{\frac{2gH}{j}}} \log \left( \frac{\sqrt{\frac{2gH}{j} + v_0} \cdot \sqrt{\frac{2gH}{j} - v_5}}{\sqrt{\frac{2gH}{j} - v_0} \cdot \sqrt{\frac{2gH}{j} + v_5}} \right) \quad (\text{Ec. 6.5})$$

Ecuación que nos servirá para hallar  $t_6$ .

Además, a partir de la ecuación 6.2, podemos deducir que al final de la fase 6, cuando la velocidad sea  $v_0$ , la aceleración en ese instante tendrá un valor  $\alpha_6$ :

$$\alpha_6 = \left( \frac{dv}{dt} \right)_{t=t_6} = \frac{\frac{2gH}{j} - v_0^2}{\frac{2L}{j}} \quad (\text{Ec. 6.6})$$

Por último, también de este periodo podemos hallar la cantidad de agua “gastada”, que será la que circule por la tubería de alimentación durante este periodo, ya que la única salida que tiene será por la válvula de choque (abierta), ya que la válvula de NR está cerrada en este periodo.

Por lo tanto, durante este periodo, la cantidad de agua vertida será:

$$Q_6 = A\rho \int v dt = A\rho \int_{v_5}^{v_0} \frac{\frac{2L}{j}v}{\frac{2gH}{j} - v^2} dv$$
$$Q_6 = \rho \frac{Al}{j} \log \frac{\frac{2gH}{j} - v_5^2}{\frac{2gH}{j} - v_0^2} \quad (\text{Ec. 6.7})$$

### 3.4 Recapitulación y definición de algunos conceptos.

Con las ecuaciones anteriores, podremos obtener de forma teórica todos los parámetros básicos de funcionamiento de una bomba de ariete, a partir simplemente de unos parámetros de entrada que dependerán de la geometría de nuestra instalación y sus componentes, así como de las pérdidas de carga que tengan lugar en ellos.

Los conceptos más importantes a la hora de evaluar si el funcionamiento de la bomba es o no conveniente serán los siguientes:

**-Tiempo de ciclo (s):** tiempo transcurrido entre un golpetazo de la válvula de choque y el siguiente. Será, por supuesto, la suma de los tiempos de cada una de las fases estudiadas:

$$t_{ciclo} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 \quad (\text{Ec. 7.1})$$

**-Caudal de agua elevada (l/min):** cantidad de agua que la bomba es capaz de subir a la altura  $h$  en un minuto. Nótese que solamente se eleva agua durante el periodo 3.

$$q \text{ (l/min)} = \frac{q_{ciclo} \cdot 60}{t_{ciclo}} = \frac{q_3 \cdot 60}{t_{ciclo}} \quad (\text{Ec. 7.2})$$

**-Caudal de agua gastada (l/min):** cantidad de agua que la bomba desaloja por la válvula de choque en un minuto. Esta agua se considerará "gastada". En este caso hay que sumar la cantidad de agua desalojada tanto en el periodo 1 como en el 6.

$$Q \text{ (l/min)} = \frac{Q_{ciclo} \cdot 60}{t_{ciclo}} = \frac{(Q_1 + Q_6) \cdot 60}{t_{ciclo}} \quad (\text{Ec. 7.3})$$

**-Rendimiento de la bomba (%):** El rendimiento de la bomba será calculado como el cociente de energía potencial final y el inicial, esto es, dependerá tanto de los caudales de agua gastada y elevada como de las alturas de alimentación y de elevación con las que estemos trabajando. Se calculará de la siguiente manera:

$$Rend(\%) = \frac{q \cdot (h-H)}{Q \cdot H} \quad (\text{Ec. 7.4})$$

### 3.5 Determinación de las constantes de operación

Todo el análisis anterior está realizado suponiendo conocidas varias constantes de operación que dependerán de la instalación física con la que estemos trabajando. Es decir, que para poder llevar a cabo un análisis completo correctamente, tendremos que aportar el valor de estas constantes de operación. A continuación se realiza un esquema de las mismas y se aporta información de cómo se puede hallar el valor de dichas constantes en cualquier instalación de bomba de ariete:

**-H:** Altura a la que se encuentra el depósito de alimentación.

**-h:** Altura de elevación, hasta la que será ascendida el agua.

**-S<sub>0</sub>:** recorrido de la válvula de choque, es decir, distancia que recorre desde la posición completamente abierta hasta que se encuentra completamente cerrada.

**-J:** constante que determina el valor de la aceleración de la válvula de choque cerrándose.

**-m:** coeficiente de pérdidas por fricción de la válvula de NR (no retorno).

**-f:** coeficiente de pérdidas por fricción de la tubería de alimentación.

**-K:** coeficiente de pérdidas debido a los elementos irregulares de la tubería de alimentación.

**-v<sub>0</sub>:** velocidad del fluido en el instante en el que comienza a cerrarse la válvula de choque (comienzo fase 1).

**-L:** longitud de la tubería de alimentación.

**-L<sub>1</sub>:** distancia desde la válvula de NR hasta el depósito ( $\approx L$ )

**-A:** área transversal de la tubería de alimentación.

**-c:** velocidad de la onda de choque transmitida en el agua por la tubería de alimentación.

Las constantes H, h, L, y A se pueden obtener midiendo directamente las piezas con las que vamos a trabajar.

S<sub>0</sub> se puede medir también, aunque resulte un poco más laborioso. En nuestro caso tomaremos como referencia el punto medio de la válvula. J se puede calcular experimentalmente, por ejemplo graficando el movimiento de la válvula, pero como comentamos en la fase 1, no será necesario ya que estimaremos un valor cercano a 2.

Los coeficientes m, f y K tendrán que ser calculados experimentalmente, o estimados a partir de los datos que dispongamos:

Para el caso del coeficiente de pérdidas K, tendremos que ver qué elementos de nuestra tubería de alimentación provocan pérdidas de carga (estrechamientos de uniones o válvulas de cierre, codos, té, aristas de entrada...) y cuantificar las pérdidas (K) generadas por cada uno de estos elementos ayudándonos de la siguiente tabla 3.1 y los siguientes gráficos (figuras 3.1 y 3.2).

	Nominal diameter, in									
	Screwed				Flanged					
	1/2	1	2	4	1	2	4	8	20	
Valves (fully open):										
Globe	14	8.2	6.9	5.7	13	8.5	6.0	5.8	5.5	
Gate	0.30	0.24	0.16	0.11	0.80	0.35	0.16	0.07	0.03	
Swing check	5.1	2.9	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	
Angle	9.0	4.7	2.0	1.0	4.5	2.4	2.0	2.0	2.0	
Elbows:										
45° regular	0.39	0.32	0.30	0.29						
45° long radius					0.21	0.20	0.19	0.16	0.14	
90° regular	2.0	1.5	0.95	0.64	0.50	0.39	0.30	0.26	0.21	
90° long radius	1.0	0.72	0.41	0.23	0.40	0.30	0.19	0.15	0.10	
180° regular	2.0	1.5	0.95	0.64	0.41	0.35	0.30	0.25	0.20	
180° long radius					0.40	0.30	0.21	0.15	0.10	
Tees:										
Line flow	0.90	0.90	0.90	0.90	0.24	0.19	0.14	0.10	0.07	
Branch flow	2.4	1.8	1.4	1.1	1.0	0.80	0.64	0.58	0.41	

Tabla 3-1 – Valores del coeficiente de pérdidas, K, para válvulas abiertas, codos y té,  
Fuente: 'Mecánica de fluidos' F. M. White

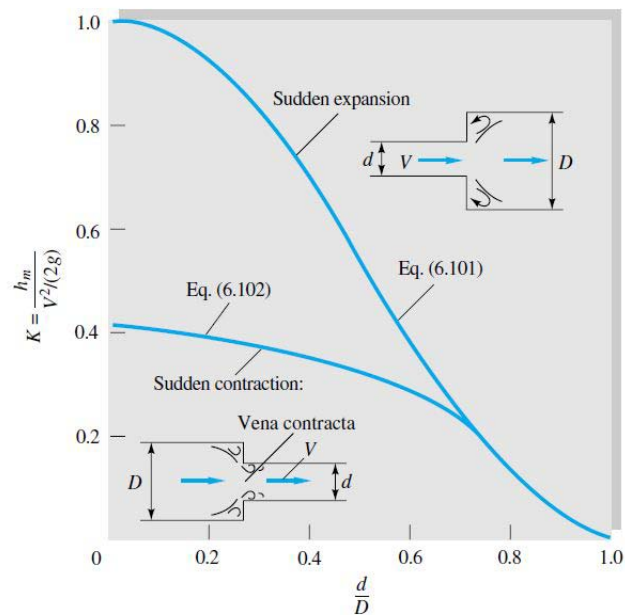


Figura 3-2 – Coeficiente de pérdidas, K, para expansiones y contracciones bruscas de conductos.  
Fuente: 'Mecánica de fluidos' F. M. White

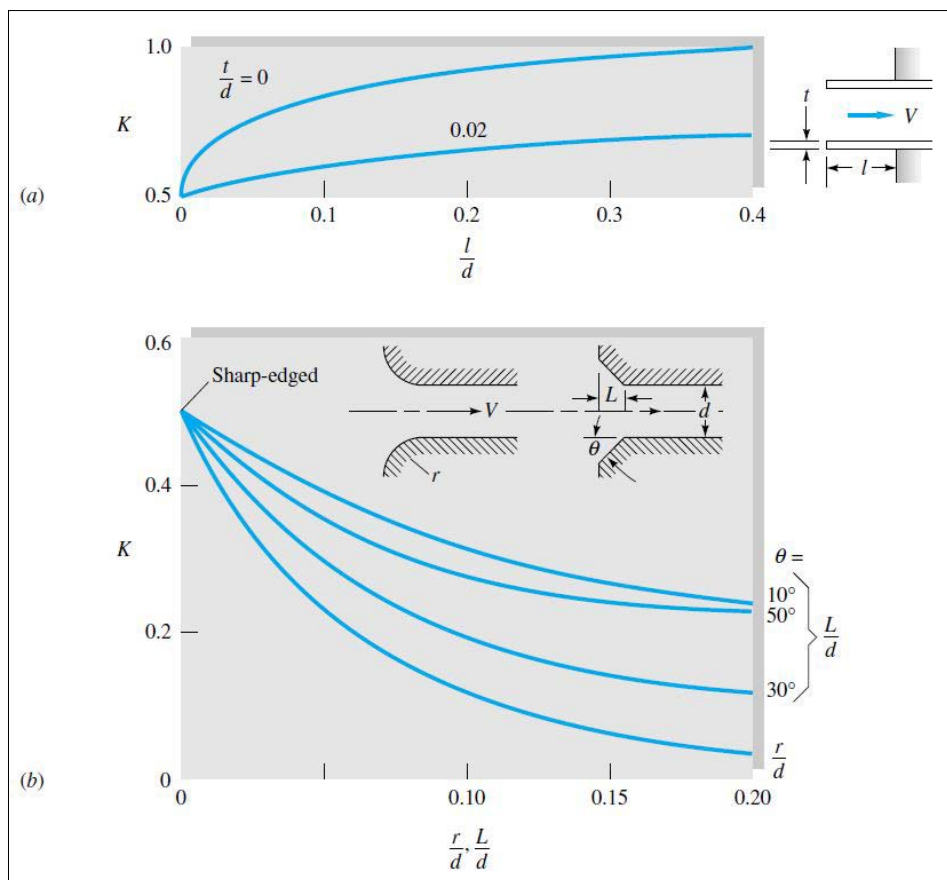


Figura 3-3 – Coeficiente de pérdidas,  $K$ , para distintas formas geométricas de entrada a un conducto.  
Fuente: 'Mecánica de fluidos' F. M. White

Finalmente, el coeficiente de pérdidas  $K$  de nuestra tubería de alimentación será la suma de los coeficientes de todos los elementos de la misma:

$$K = \sum K_i \quad (\text{Ec. 7.5})$$

Para estimar el coeficiente de fricción de la tubería de alimentación ( $f$ ), utilizaremos el diagrama de Moody (fig. 3.3) o la fórmula de Colebrook, que proporcionan este coeficiente en función del número de Reynolds de nuestro fluido y de la rugosidad relativa de la tubería. Asumiremos que el Reynolds en nuestro caso es suficientemente grande para poder situarnos en el tramo constante de la curva (flujo turbulento), de manera que el coeficiente de fricción sólo dependa de la rugosidad y el diámetro de nuestra tubería. El dato de la rugosidad puede ser obtenido de la tabla 3.2, según el material del que esté compuesta nuestra tubería de alimentación, y con él podremos situarnos en el Diagrama de Moodys (Figura 3.3), hallando el valor del coeficiente de fricción,  $f$ .

Material	Condition	$\epsilon$		Uncertainty, %
		ft	mm	
Steel	Sheet metal, new	0.00016	0.05	± 60
	Stainless, new	0.000007	0.002	± 50
	Commercial, new	0.00015	0.046	± 30
	Riveted	0.01	3.0	± 70
	Rusted	0.007	2.0	± 50
Iron	Cast, new	0.00085	0.26	± 50
	Wrought, new	0.00015	0.046	± 20
	Galvanized, new	0.0005	0.15	± 40
	Asphalted cast	0.0004	0.12	± 50
	—	Smooth	Smooth	
Brass	Drawn, new	0.000007	0.002	± 50
Plastic	Drawn tubing	0.000005	0.0015	± 60
Glass	—	Smooth	Smooth	
Concrete	Smoothed	0.00013	0.04	± 60
	Rough	0.007	2.0	± 50
Rubber	Smoothed	0.000033	0.01	± 60
Wood	Stave	0.0016	0.5	± 40

Tabla 3-2 – Valores recomendados de rugosidad para conductos comerciales.  
Fuente: 'Mecánica de fluidos' F. M. White

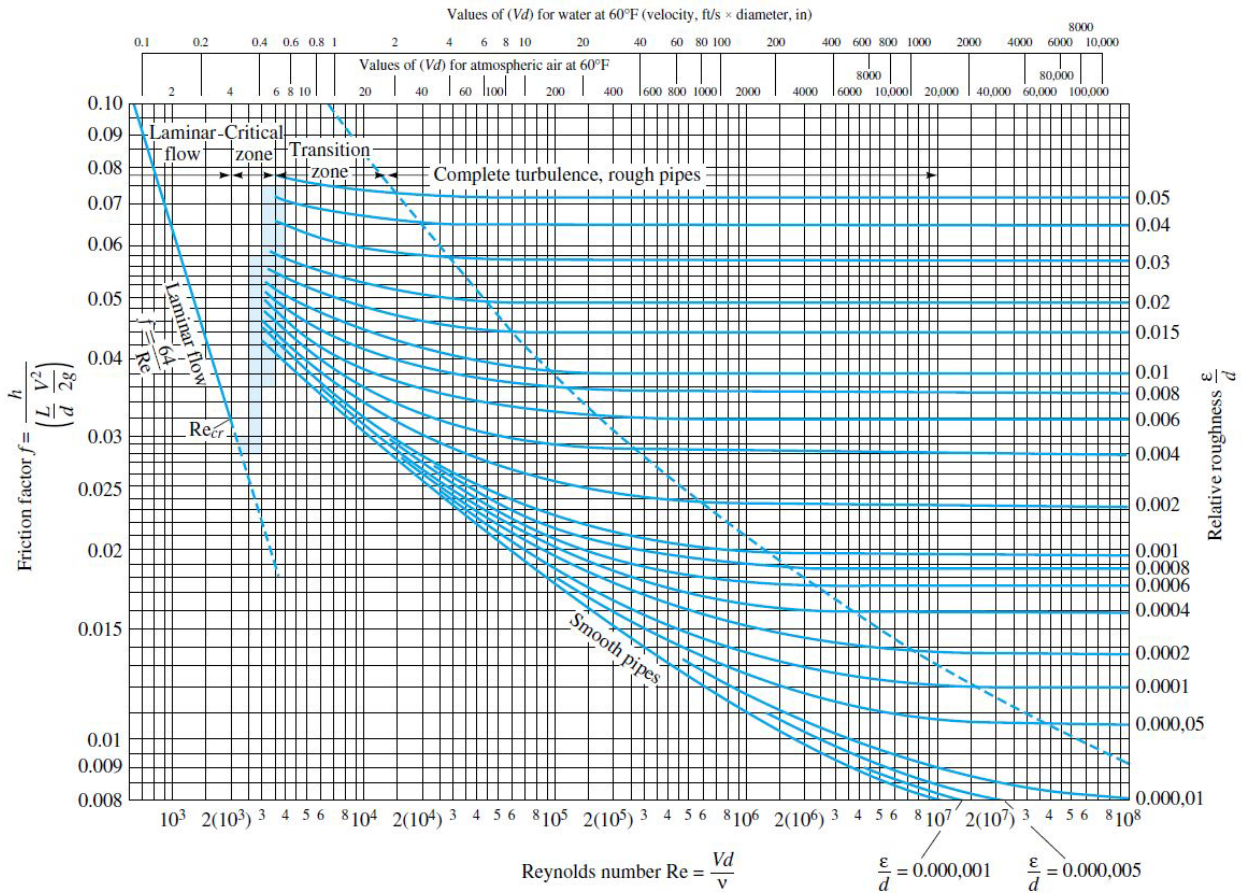


Figura 3-4 – Diagrama de Moody.  
Fuente: 'Mecánica de fluidos' F. M. White

$V_0$  también deberá ser calculada experimentalmente. Un método sería aumentar progresivamente la presión hidrostática aguas arriba de la válvula ( $h_{válvula}$ ) hasta que la válvula comenzara a cerrarse. Entonces, podríamos aplicar la ecuación de Torricelli, teniendo en cuenta las pérdidas por fricción de la tubería utilizada y de la propia válvula:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2g \cdot h_{cierre\ válvula}}{\left(\frac{fL}{D} + 1 + K\right)}} \quad (\text{Ec. 7.6})$$

Por último, para el cálculo del valor de la velocidad de transmisión de la onda de choque en el fluido ( $c$ ) tendremos que tener en cuenta el material de la tubería de alimentación, su radio y su espesor, así como las características del fluido que circule por su interior, que normalmente será agua dulce. A partir de estos datos, y mediante los cálculos correspondientes de mecánica de fluidos (ver por ejemplo 'Manual de Ingeniería hidráulica' –cap. 10.2- de A. Coutinho [1]), podremos utilizar la siguiente fórmula para hallar el valor buscado:

$$c = \left[ \frac{\rho}{\varepsilon} + \frac{\rho}{E} \left( \frac{2r}{e} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{Ec. 7.7})$$

- Siendo:
- $\rho$ : Densidad del fluido.
  - $\varepsilon$ : Módulo de elasticidad volumétrica del fluido.
  - $E$ : Módulo de Young del material de la tubería.
  - $r$ : radio de la tubería.
  - $e$ : espesor de la tubería.

Para el caso más común, que sería el de trabajar con agua dulce, los valores de  $\rho$  y  $\varepsilon$  pueden encontrarse en la siguiente tabla, en función de la temperatura de trabajo:

Temperaturas T °C	Masa específica $\rho$ Kg/m <sup>3</sup>	Peso específico $\gamma$ N/m <sup>3</sup>	Viscosidad dinámica $\mu$ Ns/m <sup>2</sup>	Viscosidad cinemática		Tensión superficial (agua – aire) $\sigma$ N/m	Tensión de vapor h metros de columna de agua a 4 °C	Módulo de elasticidad $\varepsilon$ N/m <sup>2</sup> (valores aprox.)
				$U = \mu / \rho$ m <sup>2</sup> /s	cSt			
0	999,9	9809,02	$1776 \times 10^{-6}$	$1,78 \times 10^{-6}$	1,78	0,07564	0,062	$19,52 \times 10^8$
4	1000,0	9810,00	$1570 \times 10^{-6}$	$1,57 \times 10^{-6}$	157	0,07514	0,083	
10	999,7	9807,06	$1315 \times 10^{-6}$	$1,31 \times 10^{-6}$	1,31	0,07426	0,125	$20,50 \times 10^8$
20	998,2	9792,34	$1010 \times 10^{-6}$	$1,01 \times 10^{-6}$	1,01	0,07289	0,239	$21,39 \times 10^8$
30	995,7	9767,82	$824 \times 10^{-6}$	$0,83 \times 10^{-6}$	0,82	0,07122	0,433	$21,58 \times 10^8$
40	992,2	9733,48	$657 \times 10^{-6}$	$0,66 \times 10^{-6}$	0,66	0,06965	0,753	$21,68 \times 10^8$
50	988,1	9693,26	$549 \times 10^{-6}$	$0,56 \times 10^{-6}$	0,56	0,06769	1,258	$21,78 \times 10^8$
60	983,2	9645,19	$461 \times 10^{-6}$	$0,47 \times 10^{-6}$	0,47	0,06632	2,033	$21,88 \times 10^8$
80	971,8	9533,39	$363 \times 10^{-6}$	$0,37 \times 10^{-6}$	0,37	0,06259	4,831	
100	958,4	9401,90	$275 \times 10^{-6}$	$0,29 \times 10^{-6}$	0,29	0,05896	10,333	

Tabla 3-3 – Propiedades físicas del agua dulce a presión atmosférica ( $g=9,81 \text{ m/s}^2$ ).  
Fuente: 'Manual de Ingeniería Hidráulica' A.Coutinho



Para facilitar el cálculo del módulo de Young de la tubería, se presenta a continuación una tabla donde se puede encontrar dicho valor para algunos de los materiales más comunes con los que se puede trabajar.

Material de la tubería	E x 10 <sup>-10</sup> (N/m <sup>2</sup> )
Acero	20,0 – 22,0
Aluminio	6,8 – 7,0
Hormigón	1,4 – 3,0
Hormigón pretensado	4,8
Cobre	11,0 – 13,4
Hierro fundido	8,0 – 17,0
Fibrocemento	2,4 – 3,0
Plásticos:	
PVC rígido	2,0 – 3,0
Poliétileno	0,1 – 0,2
Nylon	1,0 – 2,0
Poliéster	1,8 – 2,5
Plexiglás	0,5
Perspex	0,6
Vidrio	4,6 – 7,3

Tabla 3-4 - Módulo de elasticidad de los diferentes materiales comunes de tuberías.  
Fuente: 'Manual de Ingeniería Hidráulica' A.Coutinho

#### -Tubería de alimentación constituida por varios tramos diferenciados:

En el caso de que la tubería de alimentación estuviera compuesta por dos o más tramos de características diferentes, puede adoptarse, simplificando el cálculo, un valor ponderado para hallar el valor de c. Habría que seguir el procedimiento descrito por A.Coutinho en su 'Manual de ingeniería hidráulica' [1]:

$$\bar{c} = \frac{l}{\sum_i l_i c_i} \quad (\text{Ec. 7.8})$$

Donde:  $\bar{c}$  : Velocidad de propagación equivalente  
 l : longitud total de la tubería  
 l<sub>i</sub>, c<sub>i</sub> : longitud y velocidad de propag. correspondiente a cada tramo

### 3.6 Sistema de ecuaciones en MathCad

A continuación se transcribe el código de MathCad con el que se ha trabajado para la obtención de resultados teóricos, utilizando como datos de partida los calculados para uno de los montajes que llevaremos a cabo en el capítulo 5. Se puede observar el valor que adquiere cada una de las variables que hemos tratado a lo largo de todo este capítulo:

**Variables de entrada:****1.- Propiedades del fluido:**

$$\rho := 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$g := 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

**2.- Variables físicas de la instalación:**

$$H := 1 \text{ m}$$

$$h := 5 \text{ m}$$

$$L := 5.58 \text{ m}$$

$$D := 0.026 \text{ m}$$

$$A := \frac{\pi \cdot D^2}{4} = (5.309 \cdot 10^{-4}) \text{ m}^2$$

$$S_0 := 0.015 \text{ m}$$

**3.- Variables calculadas o estimadas:**

$$J := 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$f := 0.011$$

$$K := 7.35$$

$$j := \frac{f \cdot L}{D} + 1 + K = 10.711$$

$$M := 100 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_0 := 0.98 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$c := 950 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Ecuaciones:

$$t_1 := \sqrt{2 \frac{S_0}{J}} = 0.122 \text{ s}$$

$$\alpha_6 := \frac{2 \frac{g \cdot H}{j} - v_0^2}{2 \frac{L}{j}} = 83.632 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$v_1 := v_0 + \frac{\alpha_6 \cdot t_1}{2} = 1.031 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Q_1 := A \cdot \left( v_0 \cdot t_1 + \frac{\alpha_6 \cdot t_1^2}{2} \right) = 0.067 \text{ L}$$

$$\Delta v := \frac{4 \frac{g \cdot (h-H)}{c} + M \cdot v_1}{4 \frac{c}{M} + M} = 0.067 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_2 := v_1 - \Delta v = 0.965 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$t_2 := 0$$

$$N := \text{ceil} \left( \frac{v_1 - \Delta v}{2 \Delta v} \right) = 8$$

$$v_3 := v_1 - 2 \cdot N \cdot \Delta v = -0.036 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_r := v_1 - (2 \cdot N - 1) \cdot \Delta v = 0.031 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$t_r := 0$$

$$t_3 := \frac{2 \cdot L}{c} \cdot N = 0.094 \text{ s}$$

$$q_{\text{ciclo}} := A \cdot \frac{2 \cdot L}{c} \cdot (N \cdot v_1 - \Delta v \cdot N^2) = 0.025 \text{ L}$$

$$v_4 := -|v_3| = -0.036 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$t_4 := \begin{cases} \frac{2L}{c} & \text{if } v_3 > 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} = 0$$

$$v_5 := -v_4 = 0.036 \frac{m}{s}$$

$$t_5 := \frac{2L \cdot v_5}{g \cdot H} = 0.041 \text{ s}$$

$$t_6 := \frac{L}{j \sqrt{\frac{2g \cdot H}{j}}} \ln \left( \frac{\sqrt{\frac{2g \cdot H}{j} + v_0} \cdot \sqrt{\frac{2g \cdot H}{j} - v_5}}{\sqrt{\frac{2g \cdot H}{j} - v_0} \cdot \sqrt{\frac{2g \cdot H}{j} + v_5}} \right) = 0.685 \text{ s}$$

$$Q_6 := \frac{A \cdot L}{j} \ln \left( \frac{\frac{2g \cdot H}{j} - v_5^2}{\frac{2g \cdot H}{j} - v_0^2} \right) = 0.205 \text{ L}$$

### Resultados:

$$t_{ciclo} := t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 = 0.942 \text{ s}$$

$$Q_{ciclo} := Q_1 + Q_6 = 0.272 \text{ L}$$

$$q_{ciclo} := A \cdot \frac{2L}{c} (N \cdot v_1 - \Delta v \cdot N^2) = 0.025 \text{ L}$$

$$Q := \frac{Q_{ciclo} \cdot 60 \frac{s}{min}}{t_{ciclo}} = 17.346 \frac{L}{min}$$

$$q := \frac{q_{ciclo} \cdot 60 \frac{s}{min}}{t_{ciclo}} = 1.582 \frac{L}{min}$$

$$Rendim := \frac{q \cdot (h - H)}{Q \cdot H} = 0.365$$

## **4 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL**

El objeto de esta parte práctica del proyecto es el diseño y la construcción de un banco de pruebas para caracterizar con el mayor detalle posible las bombas de ariete que el departamento disponga en un futuro. Intentaremos ceñir la construcción a las dimensiones del laboratorio actual, y en medida de lo posible a los materiales que ya posee el departamento en sus laboratorios de Avenida del Mediterráneo.

Se ha tratado de diseñar la instalación de forma que sea posible modificar ciertos aspectos o parámetros de la misma, sin que se vea prácticamente afectado el resto de la instalación, de manera que sea posible reflejar la influencia de cada uno de estos parámetros concretos en el funcionamiento final de la bomba.

En este tema intentaremos resumir lo mejor posible todo el proceso del diseño y la construcción de los diferentes elementos que constituyen la instalación.

## 4.1 Búsqueda y adquisición de la primera bomba

Ante la necesidad de obtener una primera bomba de ariete, barajamos varias opciones, entre las que estaban construir una bomba de ariete manualmente con piezas de fontanería comunes a partir de los conocimientos que ya hemos adquirido gracias a la bibliografía (ver [6]), o comprar una ya construida a una empresa privada. Tras sopesar las opciones, se decidió que la primera bomba de ariete debería ser comprada, dejando para futuros proyectos la construcción manual y su comparación de eficiencia y rangos de funcionamiento con la que utilizemos en este proyecto.

Tras decidir que se compraría la bomba, la siguiente fase sería la recopilación de información de mercado de las mismas. Tras un tiempo de búsqueda y recopilación de información, comprobamos que las empresas que trabajan con bombas de ariete tienen precios desorbitados, del orden de 2500 euros la bomba, por lo que optamos por la opción 'low cost' que ofrecía la empresa tailandesa Meribah, que nos costaba 175 euros.

Unas semanas más tarde nos llegó por correo la bomba despiezada, y predecimos a su montaje, como se aprecia en la figura 4.1:



Figura 4-1 - Pedido despiezado de la bomba de ariete (izq.) y el mismo montado (der.)

## 4.2 Diseño y Montaje de la instalación

El esquema básico de la instalación al completo diseñada para el laboratorio de Avda. del Mediterráneo es el mostrado en la siguiente figura:

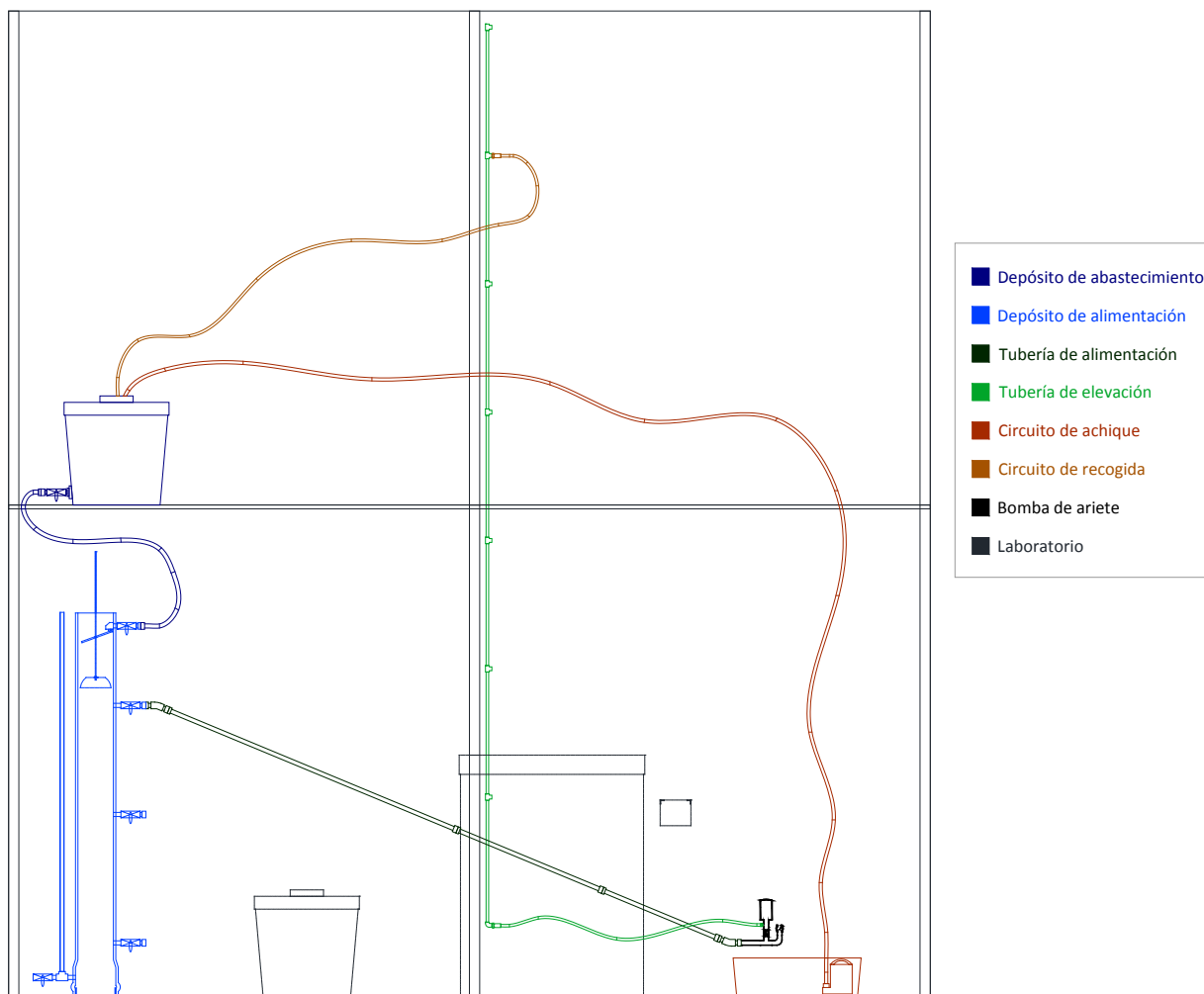


Figura 4-2 Diseño de la instalación completa en el laboratorio de Avda. del Mediterráneo  
Fuente: Elaboración propia (AutoCAD)

Para la explicación de toda la instalación en su conjunto, procederemos a ver en detalle el diseño y la construcción de cada una de las partes en las que se ha dividido:

#### 4.2.1 Depósito elevado o de abastecimiento

Este depósito tendrá que ser suficientemente grande como para poder almacenar casi la totalidad del agua con la que vayamos a trabajar, y estar a una altura mayor que la del depósito de alimentación, ya que este depósito elevado es el que le proporcionará el agua que vaya necesitando.

Usaremos un depósito troncocónico de plástico sanitario propiedad de la Universidad, mostrado en la figura 4.3. Este depósito tiene una altura de 80 cm y un diámetro medio de 70 cm, es decir, una capacidad de 350 litros, la cual será suficiente para el uso que pretendemos darle.

Este depósito tiene una salida lateral inferior roscada de 2 pulgadas. A ella le acoplaremos unas reducciones de PVC para conseguir unirle una tubería de PVC flexible de 32 mm de diámetro exterior que dirigirá el agua desde este depósito elevado hasta la válvula de nivel situada en el lateral superior del depósito de alimentación. A los dos extremos de esta tubería de PVC flexible colocaremos unas válvulas de cierre, para tener en todo momento controlado el paso de agua por la instalación, y facilitar tareas de limpieza o desmontaje.



Figura 4-3 – Esquema y detalle del depósito elevado o de abastecimiento

#### 4.2.2

#### 4.2.3 Depósito de alimentación

Este depósito es el que contiene una gran cantidad de agua de partida a una altura  $H$ , parte de la cual circulará por la tubería de alimentación hasta llegar a la bomba de ariete.

Para la correcta caracterización de la bomba de ariete, este depósito debería ser lo suficientemente grande como para que la altura  $H$  no se vea apenas influida por la cantidad de agua que va perdiendo por la tubería de alimentación. Sin embargo, dado que buscamos una instalación lo más versátil posible, necesitaremos poder variar la altura  $H$  con facilidad de unas pruebas a otras. Además buscamos caracterizar la bomba en periodos largos de funcionamiento, por lo tanto en lugar de utilizar un depósito excesivamente grande, hemos optado por utilizar un depósito tubular en el que mantendremos el nivel de agua constante a una altura  $H$  mediante un sistema de flotador que detallaremos un poco más adelante en este mismo capítulo (sección 4.2.2.1).

Para la construcción del depósito, partimos de una pieza de tubería de PVC presión PN-16 de 315 mm de diámetro exterior y 3 metros de longitud (fig. 4.4).

Se procedió a taponar uno de los extremos (el extremo inferior) con un tapón ciego de PVC de forma que la tubería grande quedara transformada en un depósito tubular, y a realizar 5 taladros situados como se indica en la figura 4.4, de manera que tengan diferentes funciones, que explicamos a continuación:



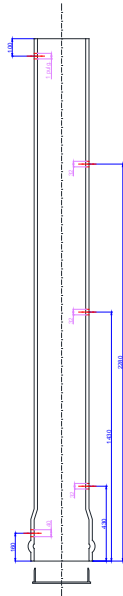


Figura 4-4 – Tubería antes de llevar a cabo la transformación en depósito.

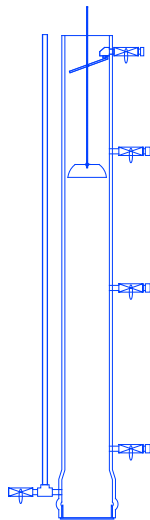


Figura 4-5 – Tubería ya transformada en depósito tubular, con las 5 salidas y el sistema regulador de nivel.

**-Taladro inferior:** Este taladro tendrá dos importantes funciones. Una de ellas será la de visualizar en todo momento la altura del nivel de agua que tengamos en el interior de nuestro depósito. Para ello conectaremos a esta salida una pequeña tubería (de 32mm de diámetro exterior) de PVC transparente que ascienda paralela a nuestro depósito, que nos permita visualizar con facilidad el nivel de agua dentro del mismo. La otra función de este taladro será la de facilitar el vaciado del depósito. Esta función es importante para el mantenimiento y

limpieza de la instalación, así como para su almacenamiento en caso de largos periodos de inutilización.

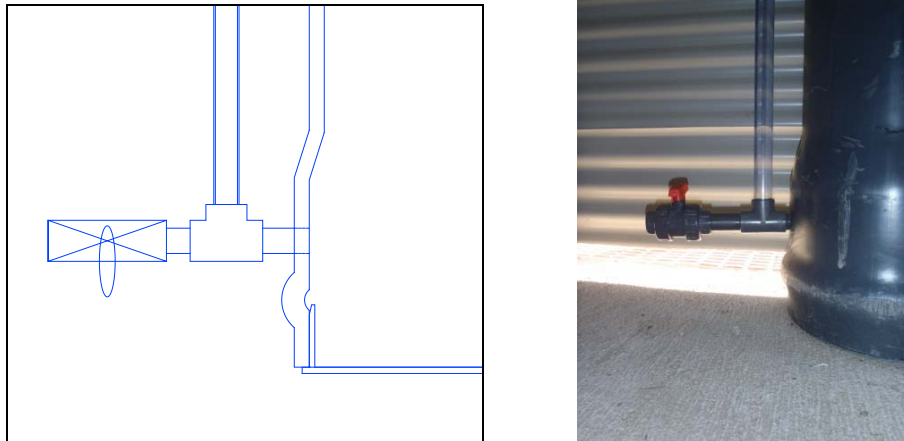


Figura 4-6 – Taladro inferior, con la salida de vaciado y el tubo visualizador de nivel.

**-Taladros intermedios:** Estos tres taladros están pensados para proporcionar tres posibles salidas a la tubería de alimentación que se dirigirá a la bomba de ariete. Cada una de estas salidas tendrá una llave de paso, ya que como solamente una de ellas estará siendo utilizada en cada configuración de la bomba, las otras dos tendrán que permanecer cerradas. La altura del inferior de estos tres será la altura a la que se encuentre la entrada a la bomba de ariete, esto es, a 43 cm del suelo o extremo inferior de nuestro depósito. Las alturas de los otros dos taladros intermedios las escogeremos según el criterio explicado más adelante, en la sección 4.2.3.



Figura 4-7 – Uno de los taladros intermedios, posible salida hacia la bomba de ariete.

**-Taladro superior:** a él irá acoplada la válvula de llenado de depósito, que recibirá agua proveniente del depósito elevado, y a la que irá enganchado el flotador que hemos diseñado, de forma que mantenga siempre un nivel de agua constante en nuestro depósito de alimentación.

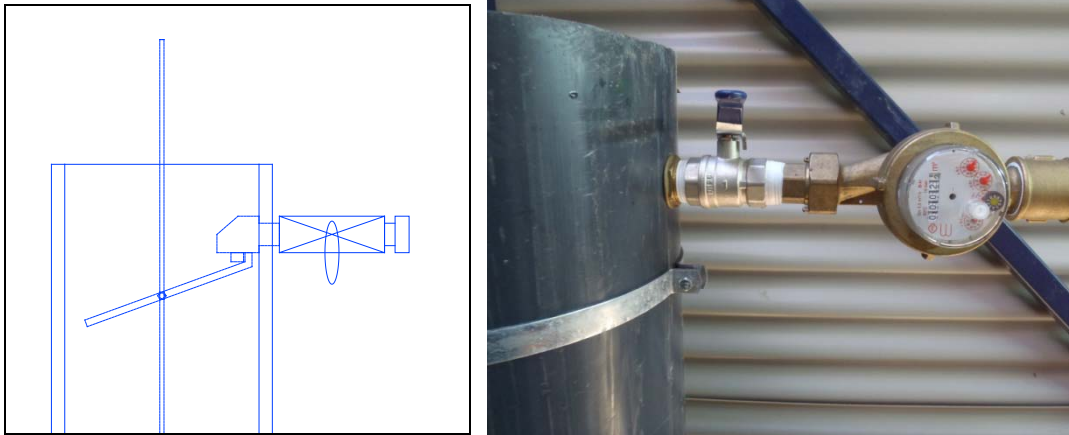


Figura 4-8 – Taladro superior, por donde se abastece el depósito de alimentación.

#### 4.2.3.1 Regulador de nivel del depósito de alimentación

Este regulador consta de una válvula reguladora de nivel que hemos modificado, accionada por una varilla roscada a cuyo extremo inferior hemos colocado un bol de plástico invertido que hace de flotador.

Para poder proporcionarnos el caudal de entrada al depósito de alimentación que necesitábamos, hemos tenido que utilizar una válvula de una pulgada de diámetro. Para poder adaptarla a nuestro depósito, hemos tenido que cortar 15 centímetros de su varilla accionadora, y para accionarla de la forma que explicamos a continuación, también ha sido necesario realizar un taladro pasante en esta varilla, como se muestra en la siguiente figura 4.9.



Figura 4-9 – Válvula reguladora de nivel, antes y después del mecanizado.

El sistema de accionado de la válvula reguladora de nivel ha sido construido a partir de unas tuercas y unas varillas roscadas de 6mm de diámetro nominal. Para llevarlo a cabo, hemos necesitado soldar un pequeño tramo de varilla roscada a una tuerca de la forma que se indica en la figura 4.10, de manera que la tuerca pueda ser colocada fácilmente en cualquier lugar de la varilla principal, y el pequeño tramo quede horizontal y atraviese el agujero pasante que previamente hemos realizado en la válvula de nivel (véase figura 4.11 a)). Al final de la varilla principal irá colocado un bol de plástico boca abajo que hará de flotador (figura 4.11 b)).



Figura 4-10 – Imágenes de la tuerca soldada y colocada en la varilla principal



Figura 4-11 – Sistema completo del regulador automático del nivel del depósito

#### 4.2.4 Tubería de alimentación

Este es a priori uno de los componentes más influyentes en el comportamiento de una bomba de ariete, por lo que se ha intentado llevar a cabo una construcción que permita variar con la mayor sencillez posible los parámetros de esta tubería, como pueden ser el material del que esté constituida, la longitud que posea o el ángulo de inclinación con el que esté montada.

Para poder llevar a cabo experimentos variando estos tres parámetros de la tubería de entrada, pensamos que unas posibles configuraciones de montaje podrían ser las siguientes, de forma que comparándolas entre ellas se pueda magnificar la influencia de cada uno de los parámetros:

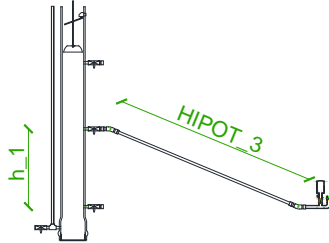
Dimensiones montajes con codos de 45°:



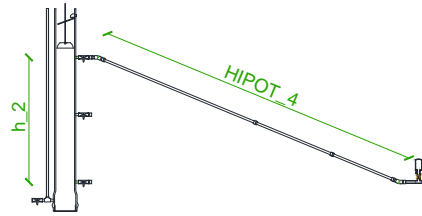
$$\text{HIPOT}_1 = h_1 / \text{sen}45^\circ$$

$$\text{HIPOT}_2 = h_2 / \text{sen}45^\circ$$

Dimensiones montajes con codos de 22°:



$$\text{HIPOT}_3 = h_1 / \text{sen}22,5^\circ$$



$$\text{HIPOT}_4 = h_2 / \text{sen}22,5^\circ$$

Teniendo en cuenta las configuraciones anteriores, podemos elegir las alturas de los taladros intermedios de la tubería de alimentación imponiendo la condición de que la longitud de la tubería en los montajes 2 y 3 sea la misma, de modo que entre estos dos montajes únicamente varíe el ángulo de inclinación de la tubería. Para ello realizaremos los siguientes cálculos trigonométricos:

Forzamos que haya una igualdad ( $\text{HIPOT}_3 = \text{HIPOT}_2$ ):

$$h_2 \cdot \text{sen}22,5^\circ = h_1 \cdot \text{sen}45^\circ$$

$$h_2 = h_1 \cdot (\text{sen}45^\circ / \text{sen}22,5^\circ) = h_1 \cdot \mathbf{1,8477}$$

Por lo tanto, dando el valor de 100 cm a  $h_1$ , obtenemos un valor de 185 cm para  $h_2$ .

Para estos dos valores de alturas de taladros respecto al inferior, tendremos 3 valores diferentes de hipotenusas:

-HIPOT<sub>1</sub> = 141 cm

-HIPOT<sub>2</sub> = HIPOT<sub>3</sub> = 262 cm

-HIPOT<sub>4</sub> = 483 cm

Para calcular la longitud de tramo de tubería, no debemos contar las longitudes de la hipotenusa que serán ocupadas por los codos y los accesorios propios de los montajes. Estas piezas ocuparán 18 cm en cada montaje, por lo que los tramos de tubería que necesitamos son:

-Tramo montaje 1: 123 cm

-Tramo montajes 2 y 3: 244 cm

-Tramo montaje 4: 465 cm

Si además observamos que el último tramo es mayor que la suma de los otros dos, podemos componerlo como la suma de los dos tramos anteriores más un tercero de longitud  $465 - 244 - 123 = 98$  cm, por lo que las longitudes finales de los tramos de tubería que necesitamos son:

**-TRAMO1: 98 cm**

**-TRAMO2: 123 cm**

**-TRAMO3: 244 cm**

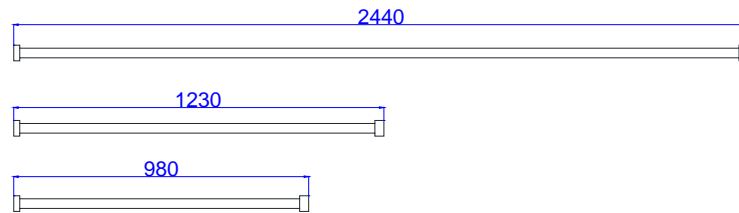


Figura 4-12 – Tramos de PVC utilizados para la tubería de alimentación

### Codos a utilizar

Los codos que se ha previsto utilizar en los montajes diseñados son de  $45^\circ$  y  $22,5^\circ$ , los cuales son sencillos de conseguir en ciertos materiales como hierro o acero galvanizado, sin embargo, el primer montaje ha sido realizado con tuberías de PVC y en España no se fabrican codos de PVC presión de  $22,5^\circ$  de la medida deseada, por lo que se ha optado por fabricarlos manualmente, calentando dos tramos de tubería y moldeándolos hasta conseguir esos  $22,5^\circ$  de curvatura, como se muestra en la siguiente figura 4.13:

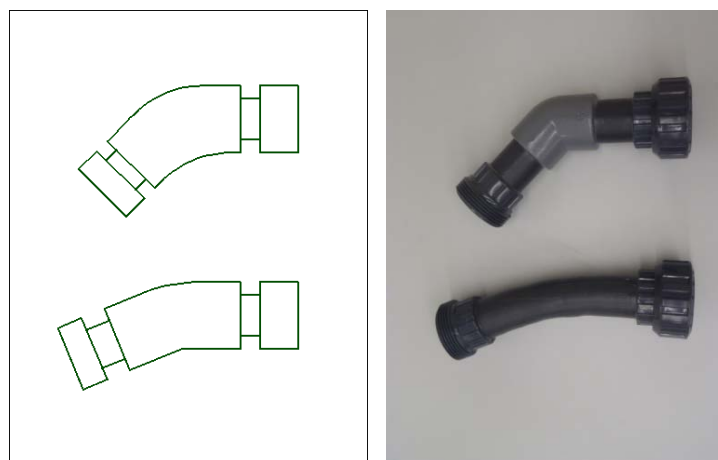


Figura 4-13 Esquema de los codos de  $45^\circ$  y  $22,5^\circ$  (izq), junto a los codos reales (der).

Todas las uniones entre los codos y los tramos de tuberías de alimentación son mediante uniones de 3 piezas, de forma que sea muy sencillo combinar unos tramos con otros.

#### 4.2.5

#### 4.2.6 Bomba de ariete

Este componente es el sometido a estudio, y como ya hemos comentado ha sido previamente comprado a una empresa privada. Sin embargo, en este apartado incluiremos también una parte del montaje que no es propiamente la bomba de ariete. Estamos hablando del sistema de fijación de la bomba.

Esta es una parte muy importante del montaje, dado que si la bomba no está firmemente sujeta, una parte considerable de la energía generada al producirse el golpe de ariete podría disiparse con las vibraciones que se produzcan, perdiendo así eficiencia.

Para garantizar la sujeción de la misma, se ha optado por crear una estructura de NIKAI, reutilizando unas barras que el departamento poseía de otros proyectos anteriores. Esta estructura estará apoyada en el suelo y a ella irá fijada la bomba de ariete mediante unas abrazaderas firmes. La estructura tendrá que dejar hueco para que bajo la bomba de ariete se sitúe el depósito de recogida, de forma que no se pierda el agua que utiliza la bomba.

En la figura 4.14 se muestra uno de los montajes de la estructura de NIKAI utilizados, y cómo está la bomba fijada a ella.



Figura 4-14 Bomba de ariete fijada a la estructura de NIKAI

#### 4.2.7

#### 4.2.8 Tubería de elevación

Por esta tubería parte del agua que sale de la bomba de ariete es dirigida a una altura  $h$ . El agua que circula por esta tubería lo hace en régimen laminar, a velocidades más bien lentas ( $Reynolds < 1$ ), por lo que cuanto menor sea el diámetro de esta tubería menor será la pérdida

de carga por fricción, que es la que predomina en esta parte de la instalación. Además, para poder estudiar los periodos transitorios de funcionamiento (cuando el agua se está elevando pero aún no ha llegado a la altura de salida  $h$ ) hemos optado por utilizar una tubería de PVC transparente de 20mm de diámetro exterior y 7 metros de longitud. A lo largo de esta tubería hemos colocado varias piezas de 'T' distanciadas 1 metro entre ellas que permitan la salida del agua a distintas alturas. Estas salidas son roscadas, de forma que las que no se están utilizando estarán cerradas con unos tapones roscados de PVC.



Figura 4-15 – Tubería de elevación, de 7 metros de longitud, fijada a la pared del laboratorio.

A la entrada inferior de la tubería de alimentación se unirá la salida de elevación de la bomba de ariete.

La tubería de elevación irá fijada a la pared de chapa del laboratorio mediante unas abrazaderas que han sido unidas a la pared mediante varillas roscadas, tuercas, arandelas de metal y arandelas de goma, para su correcta y firme sujeción en la chapa.



Figura 4-16 - Sistema de fijación de la tubería de elevación a la pared de chapa del laboratorio.

#### 4.2.9 Circuito de achique o recirculación

Este circuito no influye el funcionamiento de la bomba. Sin embargo es de vital importancia si no queremos desperdiciar grandes cantidades de agua mientras operamos con ella. La función es almacenar el agua que la bomba de ariete desperdicia, para después devolverla al depósito inicial o de abastecimiento.



Estará formado por el depósito de recogida, una bomba de achique y una tubería de recirculación:

Depósito de recogida: Este depósito almacenará el agua que sale de la bomba a través de la válvula de choque. Según las simulaciones teóricas, el caudal de agua que llega a este depósito puede llegar a ser de casi 25 l/min con la configuración más desfavorable. Por lo tanto necesitaremos un recipiente suficientemente grande. Utilizaremos un depósito ortogonal de plástico facilitado por el departamento, con medidas de 74 x 54 x 30 cm, como se muestra en la figura 4.17.



Figura 4-17 Depósito de recogida y el mismo colocado bajo la bomba de ariete.

Bomba de achique: Se trata de una bomba eléctrica sumergible de funcionamiento automático y provista de un flotador que la pone en marcha o la apaga dependiendo del nivel de agua que haya a su alrededor. En nuestro caso necesitamos una bomba con potencia suficiente como para elevar un caudal de agua de al menos 25 l/min a una altura de casi 6 metros, por lo que hemos escogido y comprado la bomba SterWins VC350 ECLI, la cual se puede observar en la figura 4.18, que según las características ofrecidas por el fabricante permite evacuar esta cantidad de agua. Esta bomba irá dentro del depósito de recogida, e impedirá que este se llene más de una determinada cantidad:



Figura 4-18 – Bomba de achique comprada para la instalación.

Tubería de recirculación: Simplemente se trata de la tubería que se acopla a la salida de la bomba y dirige el agua hasta el depósito de abastecimiento. Utilizaremos una manguera de 3/4 “ de diámetro y de 15 metros de longitud.

#### 4.2.10

#### 4.2.11 Circuito de recogida del agua elevada

El circuito de recogida del agua elevada será el encargado de recoger el agua que la bomba consiga elevar a una altura  $h$ , y devolverlo a uno de los depósitos de almacenamiento. Según estemos trabajando con una altura de elevación ( $h$ ) u otra, este circuito dirigirá el agua a uno u otro depósito.

El material que utilizaremos para este circuito será una manguera de plástico de 3/8" de diámetro.



Figura 4-19 – Circuito de recogida acoplado a una de las salidas elevadas de la tubería de elevación

### 4.3 Técnica de medida

En este punto se detalla el procedimiento utilizado para la obtención de las medidas que expondremos en el capítulo siguiente, así como los elementos que hemos necesitado para la toma de las mismas.

#### 4.3.1 Aparatos de medida

-Contador de agua: Se utilizará un contador volumétrico que disponemos en el laboratorio de proyectos anteriores, con una precisión analógica de  $0,001 \text{ m}^3$ .

-Cámara fotográfica y de vídeo: Cámara digital, modelo OLYMPUS 8010.

-Báscula: Báscula digital de precisión  $0,005 \text{ Kg}$  y peso máximo  $10 \text{ kg}$ .

-Cronómetro: Cronómetro digital, modelo CASIO HS-70W-1DF.

-Recipiente: Barreno con capacidad de almacenamiento de  $12 \text{ litros}$  de agua. Peso vacío:  $280 \text{ g}$ .



Figura 4-20 – Elementos de medida utilizados durante los ensayos

### 4.3.2 Procedimiento de medida

Para obtener las medidas que compararemos y analizaremos en el próximo capítulo, el procedimiento que se ha llevado a cabo ha sido el siguiente.

En primer lugar construye el montaje que queramos analizar, modificando la estructura de nuestra instalación, quitando y/o añadiendo algunas de las piezas que disponemos. Para cada uno de los montajes que vayamos teniendo, seguiremos los siguientes pasos:

1.- Se mantiene abierta manualmente la válvula de choque durante aproximadamente 20 segundos, dejado fluir el agua, de forma desaparezcan posibles burbujas de aire que pudiera haber en la tubería de alimentación.

2.- Se deja funcionar libremente la bomba de ariete durante tres minutos, de forma que sea más que suficiente para que alcance un estado de funcionamiento estacionario, sin apenas variaciones de los caudales de entrada y de salida.

3.- Se recoge el agua elevada durante 2 minutos exactos en el recipiente que disponemos. Utilizamos la báscula para hallar el peso del recipiente con agua, a lo que le restamos el peso del recipiente vacío y hallamos el caudal de agua elevada de la siguiente forma:

$$q \left( \frac{l}{min} \right) = \frac{\text{Peso recipiente}(kg) - \text{Peso recipiente vacío}(kg)}{\text{tiempo recogida}(min)}$$

4.- Se apunta la medida del contador (situado a la entrada del depósito de alimentación) que nos proporciona la cantidad de agua que pasa del depósito elevado al depósito de alimentación, y se apunta de nuevo la medida del contador pasados 2 minutos exactos, obteniendo el caudal de agua que llega a la bomba de ariete.

$$Q_{total} \left( \frac{l}{min} \right) = Q + q = \frac{\text{Medida 2}(l) - \text{Medida 1}(l)}{\text{tiempo transcurrido}(min)}$$

5.- Contamos en uno de esos periodos de dos minutos el número de veces que se cierra de golpe la válvula de choque. Con este dato podremos calcular el tiempo de ciclo de la siguiente manera:

$$t_{ciclo}(s) = \frac{\text{tiempo transcurrido}(s)}{\text{Número de golpes de la válvula de choque}}$$

6.- Se repiten los pasos 3, 4 y 5, de forma que tengamos dos datos de cada variable, que nos servirán para disminuir el error de medida y para comprobar si se ha cometido algún error importante en alguna de ellas.

## 4.4 Presupuesto

El presupuesto aproximado de la instalación construida es el siguiente:

	Artículo	Precio/Ud. (€)	Uds.	Precio (€)	Distribuidor	
<b>Depósito de abastecimiento</b>						
	Depósito sanitario 350 L	150,00	1	150,00	-	*Estimado
	Terminal Rosca Macho PVC 32mm	0,38	4	1,51	S.Pereda	
	Reducción PVC 40-32	0,51	1	0,51	BricoMart	
	Reducción PVC 50-40	0,62	1	0,62	BricoMart	
	Llave de paso metálica 1"	4,30	1	4,30	S.Pereda	
	Unión 3 piezas PVC 32mm	1,05	3	3,15	S.Pereda	
	Tubería PVC flexible 1,5m 32mm	1,97	2	3,94	S.Pereda	
<b>Depósito de alimentación</b>						
	Tubería PVC 315mm PN16	150,00	1	150,00	-	*Estimado
	Tapón ciego PVC 315mm	48,52	1	48,52	Yadaplás	
	Llave de paso metálica 1"	4,30	1	4,30	S.Pereda	
	Válvula de nivel 1"	9,22	1	9,22	S.Pereda	
	Varilla roscada 6mm	0,41	2	0,83	S.Pereda	
	Juego de arandelas y tuercas	0,50	1	0,50	BricoMart	
	Bol de plástico	4,31	1	4,31	Resopal	
	Llaves de paso PVC 32mm	4,00	4	16,00	-	*Estimado
	Pieza'T' PVC 32mm	1,00	1	1,00	-	*Estimado
	Tubería 3m PVC transp. 32mm	12,60	1	12,60	Ketersa	
	Abrazadera 315mm	1,73	1	1,73	S.Pereda	
	Abrazadera 32mm	0,52	1	0,52	S.Pereda	
<b>Tuberías de alimentación</b>						
	Tubería 2,5m PVC PN16 32mm	2,75	3	8,25	BricoMart	
	Codo 45º PVC 32mm	0,45	2	0,90	S.Pereda	
	Unión 3 piezas PVC 32mm	1,05	10	10,50	S.Pereda	
	Terminal Rosca Macho PVC 32mm	0,38	4	1,51	S.Pereda	
<b>Bomba de ariete</b>						
	Bomba de ariete	175,00	1	175,00	Meribah	
	B. de ariete - Gastos de envío	160,00	1	160,00	Meribah	
	Abrazadera 1 1/4"	0,65	4	2,60	S.Pereda	
	Estructura NIKAI	70,00	1	70,00	-	*Estimado
<b>Tubería de elevación</b>						
	Racor empalme	0,46	2	0,92	S.Pereda	
	Empalme rápido 15mm	0,46	2	0,92	S.Pereda	
	Tubo 5m PVC flex. transp. 20mm	8,00	1	8,00	LeroyMerlin	

Tubería 1m PVC transp. 20mm	3,70	7	25,90	Ketersa
Abrazadera isofónica 20mm	0,20	6	1,20	S.Pereda
Juego de arandelas y tuercas	4,50	1	4,50	BricoMart
Codo 90° PVC 20mm	0,13	1	0,13	S.Pereda
Pieza 'T' PVC 20mm	0,41	7	2,89	S.Pereda
Tapón a rosca PVC 20mm	0,14	7	0,99	S.Pereda
<b>Circuito de achique</b>				
Depósito de recogida	75,00	1	75,00	-
Bomba de achique	42,95	1	42,95	LeroyMerlin
Manguito rosca PVC 32mm	0,51	1	0,51	LeroyMerlin
Machón reductor 1 - 3/4	0,87	1	0,87	LeroyMerlin
Válvula anti-retorno 3/4"	2,80	1	2,80	S.Pereda
Racor empalme	0,46	1	0,46	S.Pereda
Empalme rápido 19mm	0,68	1	0,68	S.Pereda
Manguera 15m 3/4"	8,70	1	8,70	S.Pereda
<b>Circuito de recogida</b>				
Racor empalme	0,46	1	0,46	S.Pereda
Empalme rápido 15mm	0,46	1	0,46	S.Pereda
Manguera 15m 3/8"	7,95	1	7,95	LeroyMerlin

\*Estimado

<b>TOTAL INSTALACIÓN:</b>	<b>1.028,60 €</b>
---------------------------	-------------------

## 5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este apartado mostraremos los resultados obtenidos en la fase de caracterización, que han sido obtenidos siguiendo el procedimiento anteriormente descrito.

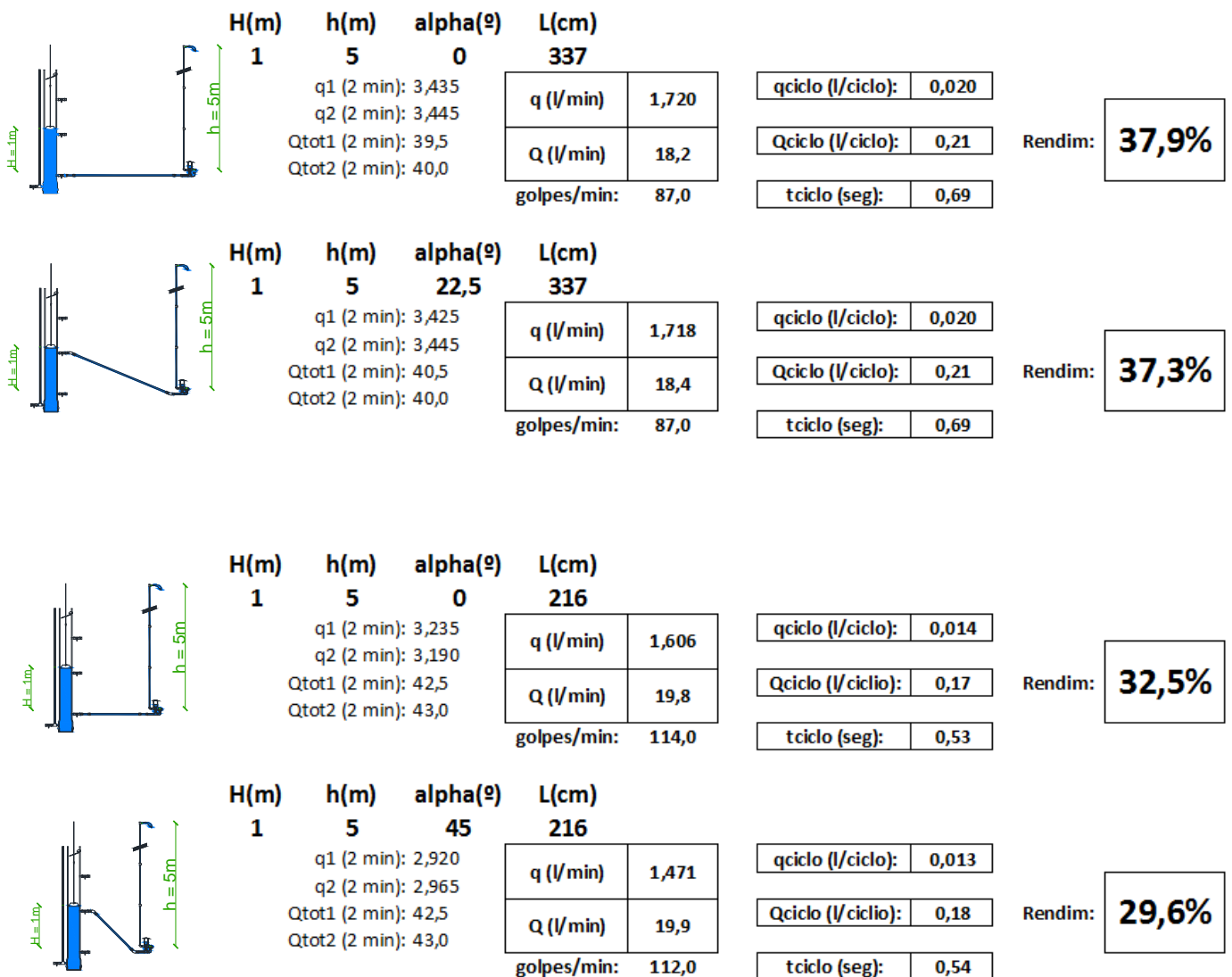
Para llevar a cabo una primera caracterización de la bomba de ariete que hemos adquirido, lo que haremos será variar algunos aspectos de la instalación construida, sin alterar el resto de la misma, para ver en una primera instancia la influencia de cada uno de estos aspectos por separado en el funcionamiento global de la bomba.

En el proyecto en que nos enmarcamos hemos decidido variar por separado 4 de estos aspectos, que serán la altura de elevación ( $h$ ), la altura de trabajo ( $H$ ), el ángulo de inclinación de la tubería de alimentación ( $\alpha$ ) y la longitud de la tubería de alimentación ( $L$ ).

Tras la obtención y el análisis de los resultados experimentales que hayamos obtenido en cada uno de los apartados de este capítulo, intentaremos compararlos con los que esperábamos obtener según el modelo teórico que hemos desarrollado previamente en el capítulo 3.

## 5.1 Efecto del ángulo de inclinación de la tubería de alimentación, $\alpha$

Para evaluar la influencia que tiene la inclinación de la tubería de alimentación en el funcionamiento y el rendimiento de nuestra instalación de bomba de ariete, vamos a comparar los resultados obtenidos en varias pruebas realizadas. En todas las pruebas realizadas en este apartado, mantendremos invariantes tanto la altura de alimentación ( $H=1\text{m}$ ) como la altura de elevación ( $h=5\text{m}$ ). En primer lugar utilizaremos el tramo de tubería de 244 cm, y variaremos la inclinación de la tubería de alimentación ( $\alpha$ ) de  $0^\circ$  a  $22,5^\circ$ , y en segundo lugar, con el tramo de tubería de 123 cm, experimentaremos con ángulos de inclinación de  $0^\circ$  y  $45^\circ$ .



### Comentario de los resultados:

Si comparamos los resultados obtenidos en los dos primeros montajes, podemos observar que la duración del ciclo es exactamente la misma, con inclinación de la tubería de alimentación y sin ella, y los caudales de salida son prácticamente idénticos, si bien parece que el caudal de

agua gastada es ligeramente más alto en la prueba con la inclinación de la tubería, lo que provoca que el rendimiento sea un poco más bajo en este caso.

Entre los resultados del tercer y el cuarto montaje parece que las diferencias están algo más marcadas. El montaje con la tubería de alimentación recta es capaz de bombear más agua por minuto ( $q$ ) que el montaje con los  $45^\circ$  de inclinación de tubería. No sólo eso, sino que además lo hace gastando ligeramente menos cantidad de agua ( $Q$ ). En esta comparación podemos observar que el rendimiento aumenta un 3% si no inclinamos la tubería de alimentación.

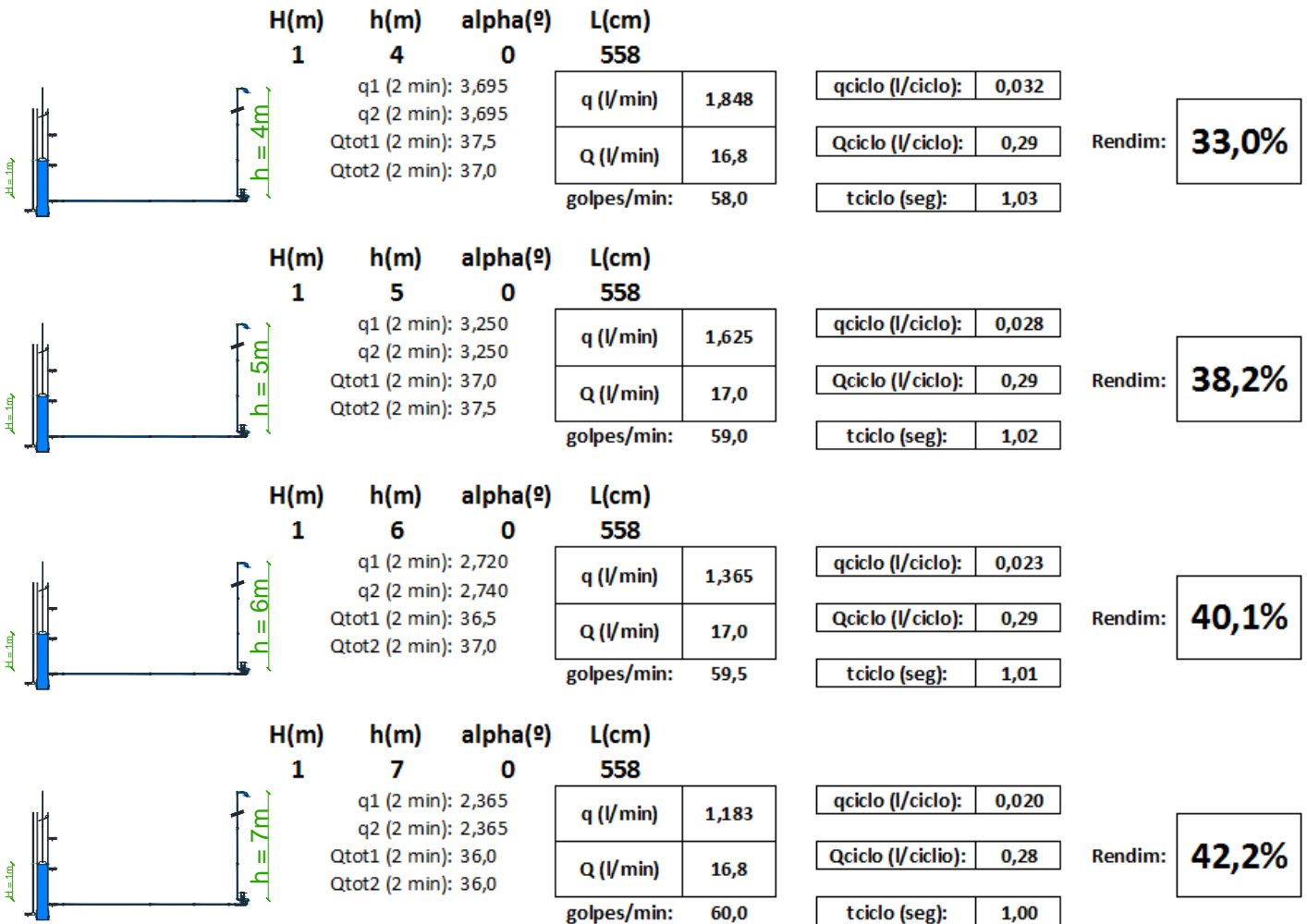
Parece que podemos concluir que los resultados son mejores cuando no existe inclinación alguna de la tubería de alimentación. Algunos autores (por ejemplo [6]) afirman que una ligera inclinación de la tubería de alimentación ayuda al fluido a acelerarse y mejora el rendimiento de la bomba de ariete. Nosotros hemos comprobado que, aún en caso de ser así, es predominante el efecto de la pérdida de carga provocado por los codos. Es curioso destacar también que los codos de  $22,5^\circ$ , al haberlos fabricado nosotros mismos, tienen una inclinación menos brusca, como podemos observar en la figura 4.13, por lo que introducen una menor pérdida de carga, lo que hace que el rendimiento no se vea tan afectado.



## 5.2 Efecto de la altura de elevación, h

Para poder hacernos una idea de la influencia que tiene la altura de elevación, vamos a realizar experimentos recogiendo el agua elevada a distintas alturas, manteniendo la altura de alimentación constante (1 metro), utilizando para la tubería de alimentación la configuración que nos proporcione una longitud de ésta mayor (acoplaremos los tres tramos de tubería disponibles) sin inclinación de la misma ( $\alpha=0$ ). Las alturas de elevación probadas han sido de 4, 5, 6 y 7 metros.

Para alturas de elevación inferiores a 4 metros ( $h=2\text{m}$  y  $h=3\text{m}$ ) no fue posible la toma de medidas, puesto que con estas configuraciones, la válvula de choque no se abría tras dar uno o dos golpes, deteniendo el funcionamiento de la bomba de ariete. Esto es debido a que la diferencia de presiones de trabajo (presión a uno y otro lado de la válvula de NR) no es suficientemente grande, por lo que las ondas de choque que se generan son algo débiles, y se disipan antes de provocar la depresión que ayuda a la válvula de choque a volver a abrirse.



### Comentario de los resultados:

Observando los resultados, llama la atención que la cantidad de agua gastada es la misma para las cuatro configuraciones. Puede resultar extraño a simple vista, pero si nos paramos a pensar, nos daremos cuenta que las fases en las que la bomba pierde agua (fases 1 y 6), la válvula de NR permanece cerrada, de manera que la presión en la tubería de elevación ( $h$ ), no influye para nada, por lo que la cantidad de agua gastada por ciclo ( $Q_{\text{ciclo}}$ ) deberá ser la misma para cualquier altura de elevación ( $h$ ), y como el tiempo de ciclo es prácticamente el mismo, el agua gastada por minuto ( $Q$ ) apenas varía.

El parámetro que sí que varía, como es de esperar, es el caudal de agua elevada ( $q$ ), que disminuye a medida que la altura de elevación es mayor. Sin embargo, el rendimiento es mayor cuanto más alta la altura de elevación, por lo que es más eficiente elevar menos agua a más altura.

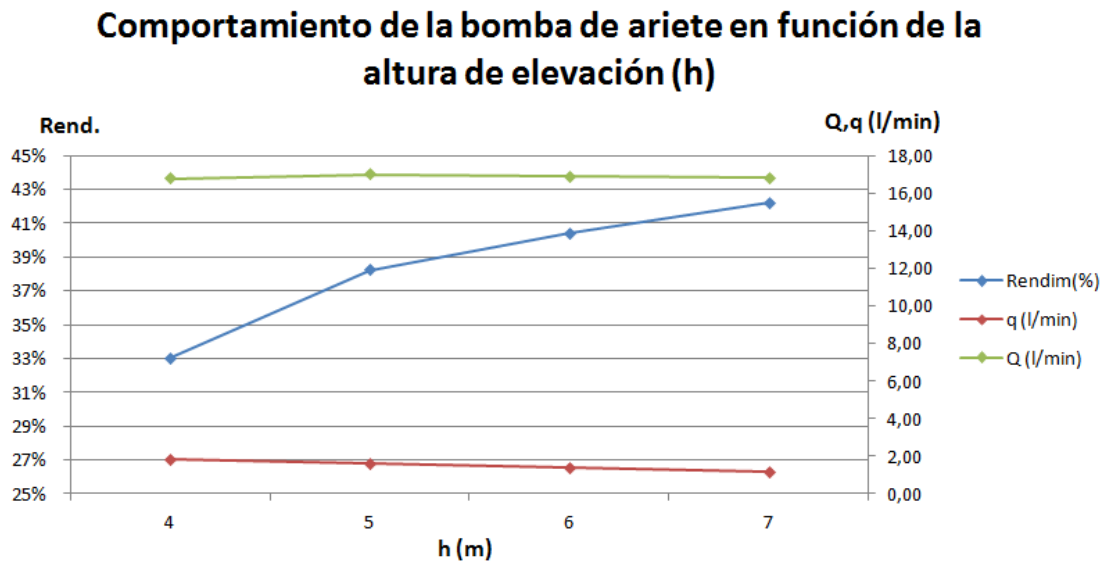


Figura 5-1 – Variación de los resultados experimentales en función de la altura de elevación

Dadas las limitaciones de espacio en el laboratorio, no hemos podido conseguir medidas para alturas de elevación mayores de 7. Sin embargo, por la tendencia de la curva del rendimiento que se observa en la figura 5.1, parece que podríamos haber obtenido rendimientos aún mayores.

Lo que sí que podemos hacer es utilizar nuestro modelo teórico, elaborado en MathCad, para hacernos una idea de si realmente sería así. Para ello hemos dado diferentes valores teóricos a  $h$ , para ver cómo se comportaban las variables medidas ( $Q$ ,  $q$  y  $\eta$ ) según nuestro modelo. A continuación se representan 2 gráficos con los valores que según el modelo teórico tendrían estas variables en función de la altura de elevación:

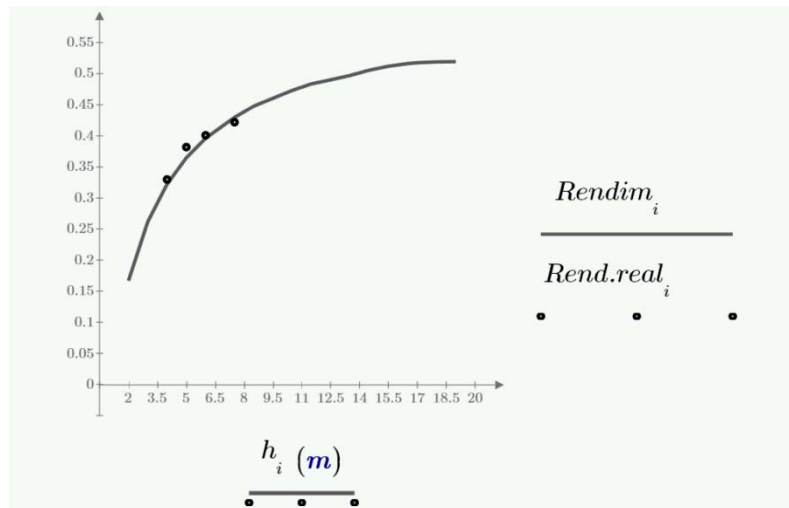


Figura 5-2 - Variación del rendimiento teórico con la altura de elevación, y su comparación con el real

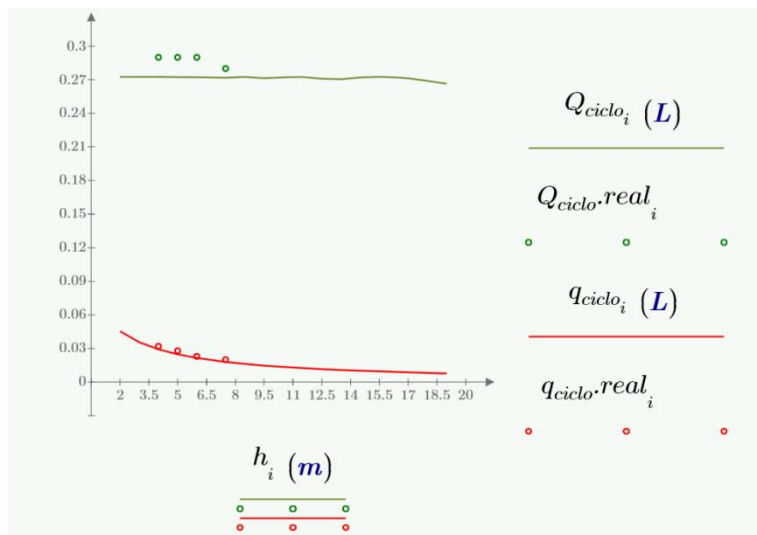


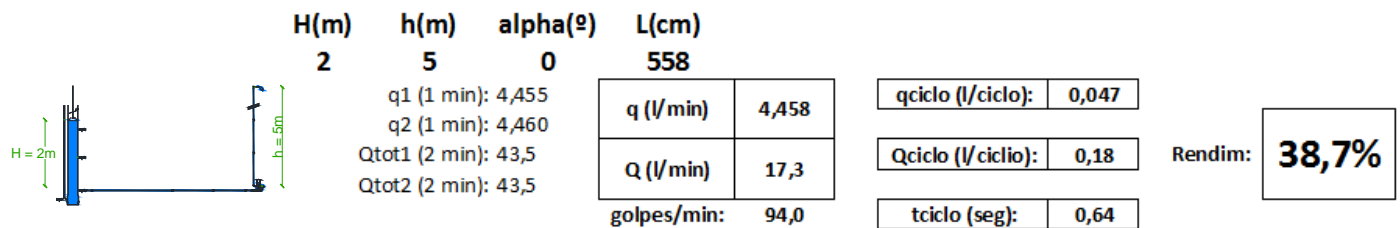
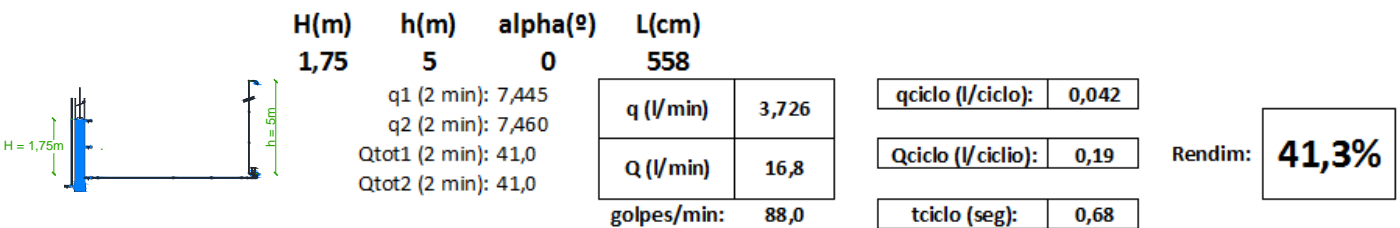
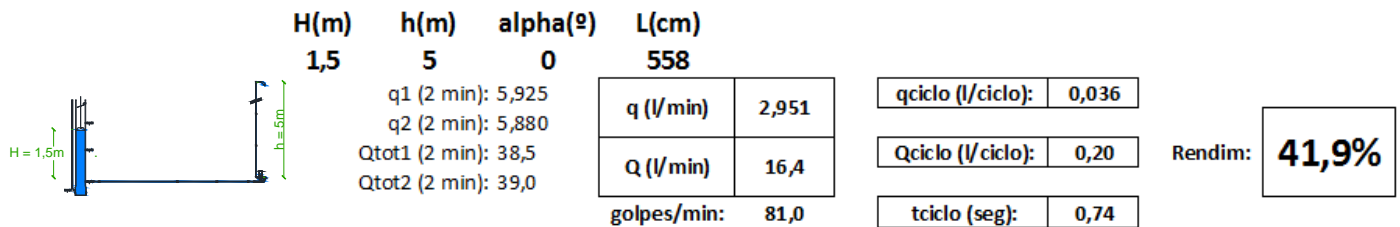
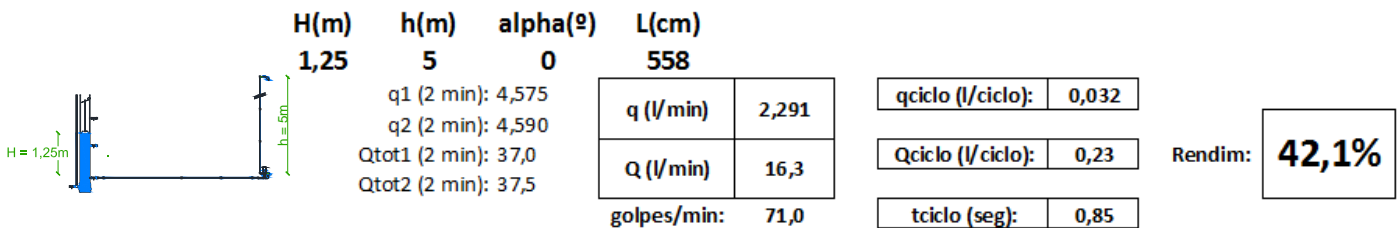
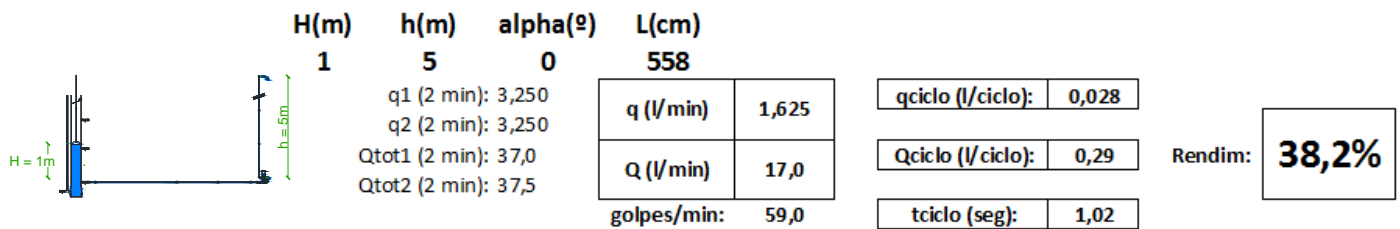
Figura 5-3 – Variación de los caudales de trabajo con la altura de elevación, y su comparación con los ensayos

A la vista de los resultados obtenidos, parece ser que el modelo teórico se comporta de manera muy similar a la realidad en cuanto a rendimiento y caudales por minuto en el rango de funcionamiento que hemos podido comparar, y que como habíamos supuesto, para alturas de elevación aún mayores de los 7 metros, aunque la cantidad de agua elevada sea menor, el rendimiento sigue aumentando incluso sobrepasando el 50% para una altura de elevación de 20 metros.

### 5.3 Efecto de la altura de alimentación, H

Para evaluar el efecto de la altura de alimentación, vamos a realizar varias pruebas modificando el nivel de agua del depósito de alimentación, mientras mantenemos constante la altura de elevación ( $h=5\text{m}$ ), la longitud de la tubería de alimentación (la más larga disponible,  $L= 558\text{ cm}$ ), y la inclinación de esta última ( $\alpha=0^\circ$ ).

Se han realizado 5 pruebas, para alturas de alimentación desde 1 metro hasta 2 metros, aumentando en cada prueba la altura de alimentación ( $H$ ) en 25 cm. Los resultados obtenidos son los siguientes:



### Comentario de los resultados:

Observando los resultados, comprobamos que el tiempo de ciclo disminuye considerablemente a medida que aumentamos la altura de alimentación, ya que el fluido se acelera mucho más rápidamente al haber más presión de alimentación, alcanzando más rápidamente la velocidad necesaria para cerrar la válvula de choque y comenzar un nuevo ciclo.

Un comportamiento curioso es el del caudal gastado (Q), que parece que no se ve afectado por la altura de alimentación.

En cuanto al caudal de elevación, aumenta linealmente con la altura de elevación, consiguiendo elevar cada vez una mayor cantidad de agua, sin embargo a partir de una altura de alimentación mayor que 1,25 metros es cada vez energéticamente menos rentable, ya que vemos que el rendimiento parece llegar a un valor máximo en esta altura.

### **Comportamiento de la bomba de ariete en función de la altura de alimentación (H)**

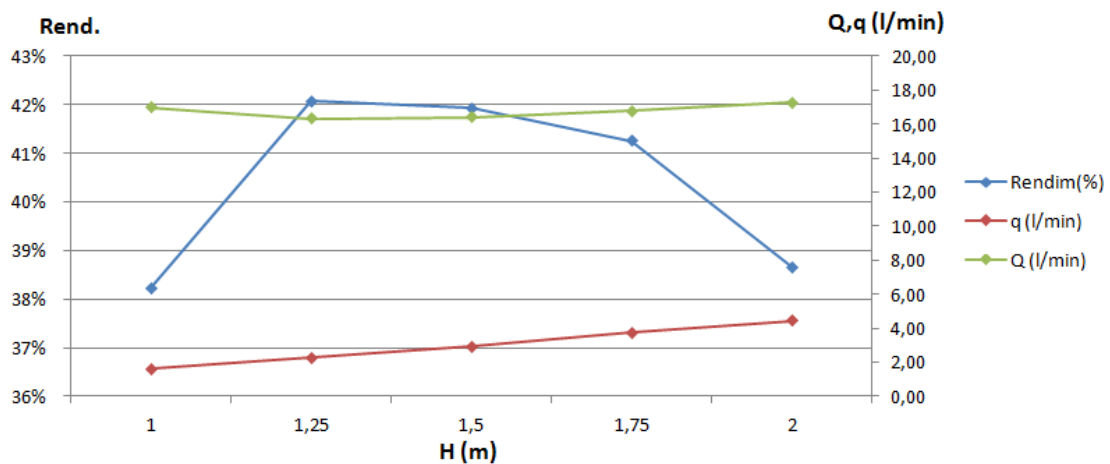


Figura 5-4 - Variación de los resultados experimentales en función de la altura de alimentación

Si comparamos ahora los valores experimentales con los obtenidos según las ecuaciones del modelo teórico del capítulo 2, podemos representar el gráfico de la figura 5.5, en el que se compara el rendimiento esperado con los datos que hemos obtenido.

En este gráfico se puede comprobar, que aunque el rendimiento es más alto en la bomba real, el comportamiento sí que parece regirse por las mismas pautas. En el caso del modelo, se obtiene un rendimiento máximo del 37% para una altura de alimentación de 1,25 m, rendimiento que disminuye a medida que nos alejamos de este valor tanto en un sentido como en otro. El rendimiento experimental ha resultado del 42%, pero como hemos comentado, la forma de la curva sí que parece la misma.

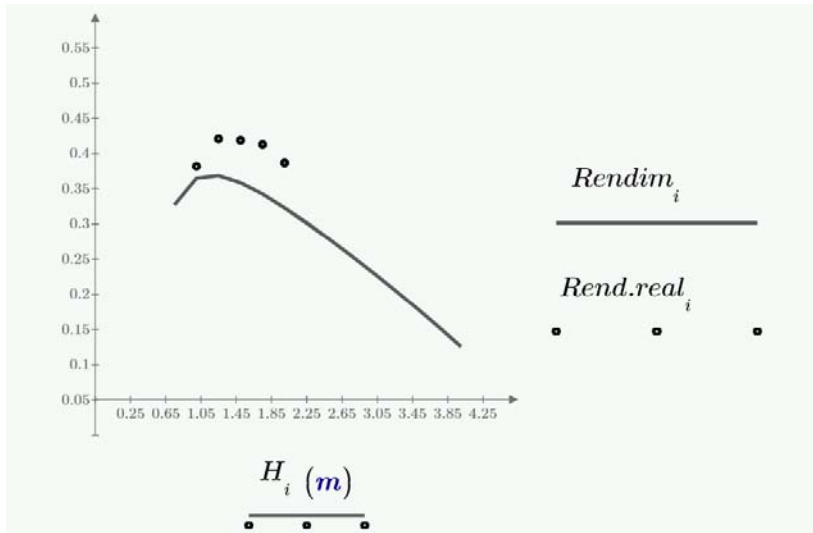


Figura 5-5 - Variación del rendimiento teórico con la altura de alimentación, y su comparación con el real

Además, si observamos los valores teóricos y experimentales de los caudales de elevación y de agua gastada por ciclo (fig. 5.6), comprobamos que el modelo se ajusta notablemente a la realidad, con lo que nos podemos hacer una idea bastante realista de cuál podría ser la tendencia de estas variables en caso de seguir aumentando la altura de alimentación en nuestra instalación

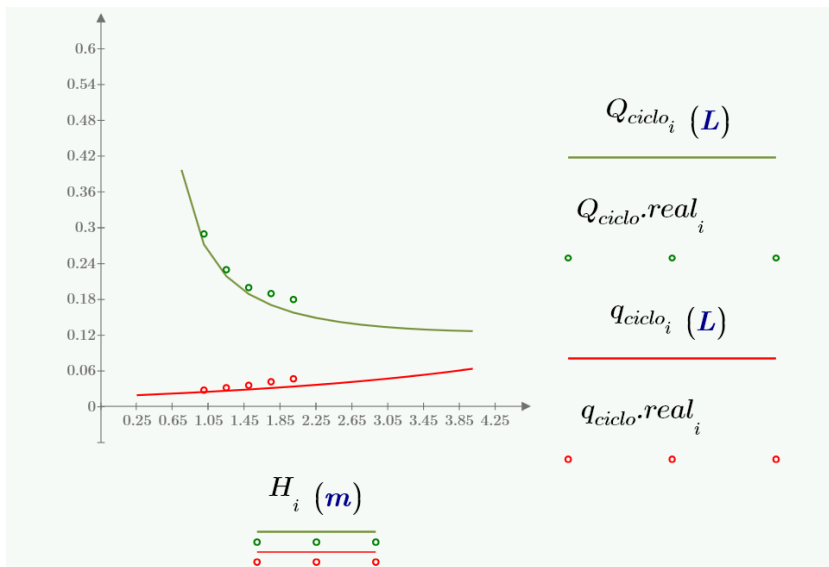
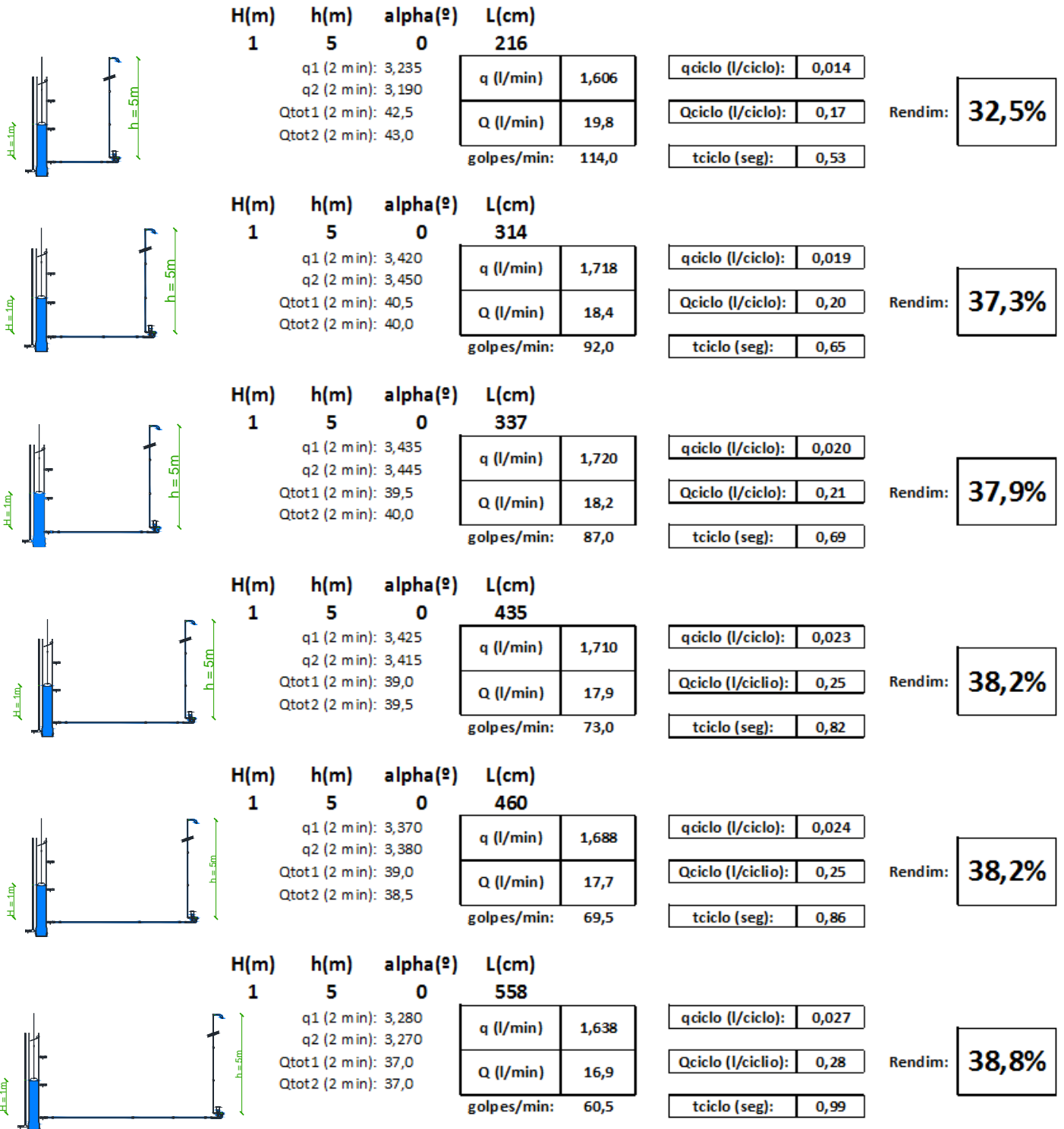


Figura 5-6 - Variación de los caudales de trabajo con la altura de alimentación, y su comparación con los ensayos

## 5.4 Efecto de la longitud de la tubería de alimentación, L

En este caso, lo que haremos será mantener constantes la altura de elevación ( $h=5\text{m}$ ), al altura de alimentación ( $H=1\text{m}$ ), y probar las diferentes longitudes de tubería que podemos lograr con la combinación de los tres tramos de tubería que tenemos (ver figura 4.12), siempre manteniendo una inclinación de las mismas horizontal ( $\alpha=0^\circ$ ). A continuación se presentan los resultados de los ensayos medidos:



### Comentario de los resultados:

En este caso, se observa que a medida que aumentamos la longitud de la tubería de alimentación,  $L$ , aumenta también el tiempo de ciclo, lo cual tiene perfecto sentido, ya que por una parte aumenta el tiempo necesario para acelerar el fluido por la tubería de alimentación (fase 6) ya que las pérdidas por fricción aumentan, y por otra parte, las ondas de choque tardan más en recorrer la tubería de alimentación (fase 3). Sin embargo, la duración del ciclo no nos dice nada en este caso sobre el rendimiento, ya que al aumentar tanto el tiempo de la fase 6 como el de la fase 3, aumentarán tanto la cantidad de agua gastada por ciclo ( $Q_{\text{ciclo}}$ ) como la de agua elevada ( $q_{\text{ciclo}}$ ).

Sin embargo, si nos fijamos en los caudales en litros por minuto, podemos observar que mientras el caudal elevado ( $q$ ) no depende apenas de la longitud de la tubería de alimentación, el caudal de agua gastada ( $Q$ ) sí que disminuye a medida que aumentamos la longitud de esta tubería, lo cual hace que el rendimiento aumente.

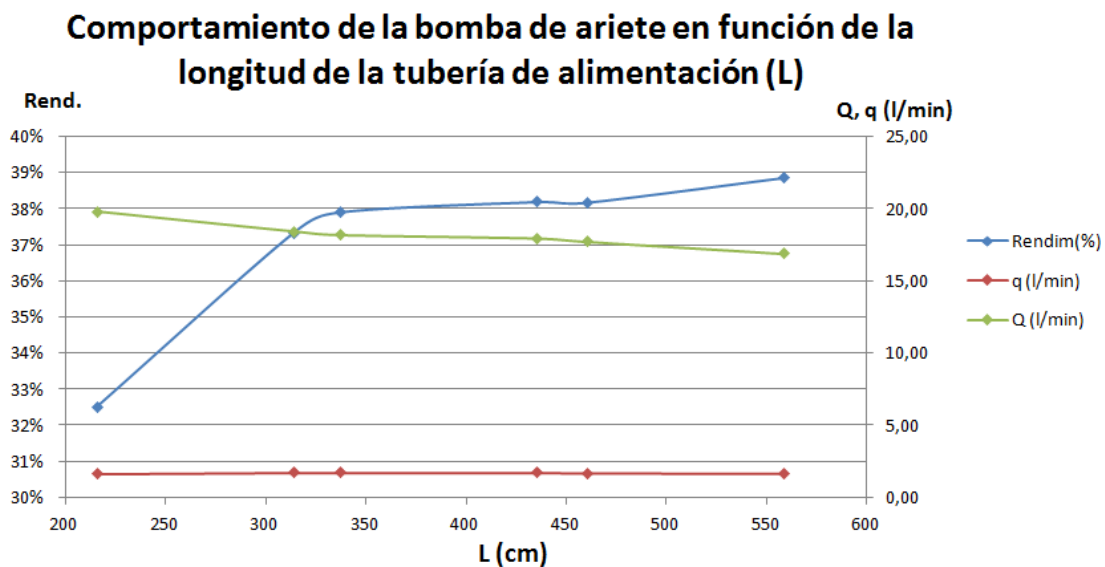


Figura 5-7

Sin embargo, nos puede surgir la duda de si esta disminución de caudal de agua gastada ( $Q$ ) y el aumento del rendimiento seguirá reflejándose para valores más altos de  $L$ .

Para comprobarlo, tendremos que recurrir de nuevo al modelo teórico que elaboramos en el capítulo 3. Éste nos proporcionará los gráficos que se pueden ver en las figuras 5.8 y 5.9, en los que se representan el rendimiento y los caudales de agua teóricos para un mayor rango de longitudes de tubería de alimentación.



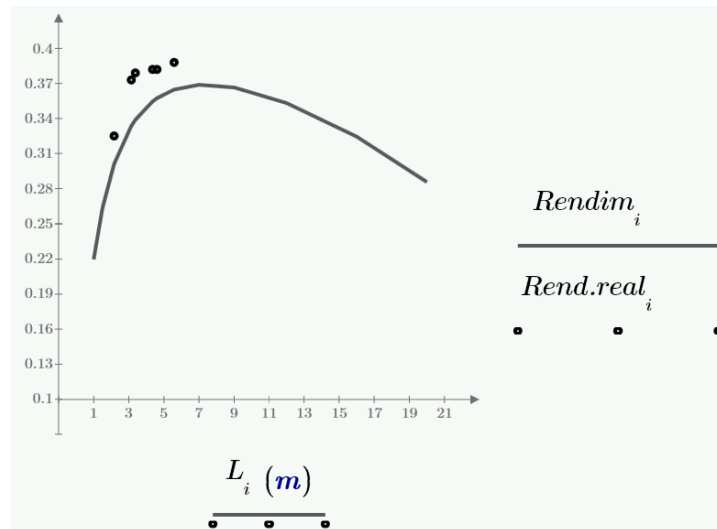


Figura 5-8- Variación del rendimiento teórico con la L de la tubería de alimentación, y su comparación con el real

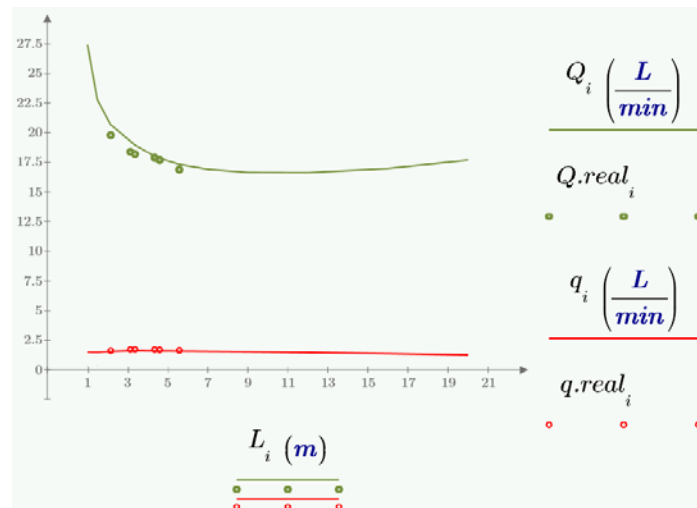


Figura 5-9 - Caudales de trabajo en función de la tubería de alimentación, y la comparación con los ensayos

A la vista de los resultados teóricos, parece ser que este aumento del rendimiento que hemos detectado sólo ocurre hasta un valor determinado de la longitud de la tubería de alimentación, a partir del cual no sólo no aumenta más el rendimiento, sino que vuelve a descender. En el caso de los resultados teóricos este rendimiento máximo se consigue para una tubería de alimentación de 7 metros de largo.

En cuanto a los caudales de funcionamiento, las curvas teóricas nos dejan intuir que a partir de cierto valor de L, comenzará a aumentar el caudal de agua gastada, y a disminuir ligeramente el de agua elevada, por lo que no parece que nos vaya a compensar aumentar mucho la longitud de la tubería de alimentación.

## 6 CONCLUSIONES

En el presente proyecto hemos conseguido construir el banco de ensayos para bombas de ariete, tal y como nos habíamos planteado en un principio, siendo esta construcción incluso más completa de lo inicialmente teníamos planteado crear, aunque nos ha costado más tiempo y trabajo del que habíamos previsto.

La caracterización de la bomba llevada a cabo durante el proyecto, aun no siendo uno de los objetivos principales, sino simplemente una comprobación de que era posible una primera toma de medidas, ha sido un éxito, dentro de las limitaciones propias del tamaño físico del laboratorio disponible, obteniendo medidas consistentes y perfectamente coherentes. El problema más notable durante esta caracterización ha sido el inconveniente que nos hemos encontrado al intentar tomar alguna medida concreta, cuando se cerraba la válvula de choque y no se volvía a abrir, deteniendo el funcionamiento de la bomba con la que trabajamos, ya que ésta no está diseñada para trabajar con ciertas alturas de trabajo.

En las pruebas realizadas, hemos conseguido llegar a un rendimiento máximo del 42,1%, el cual es más que aceptable, sobre todo teniendo en cuenta que no consume electricidad ni necesita esfuerzo físico para funcionar, pero además no parece descabellado aventurar que se pueden lograr rendimientos más altos (en torno al 60%) para esta bomba, si aumentáramos las alturas de trabajo (al menos la altura de elevación,  $h$ ).

En cuanto al modelo teórico, los resultados proporcionados por éste han sido más que aceptables, ya que los datos obtenidos mediante este modelo no solamente tienen sentido y lógica, sino que además hemos comprobado que se acercan a la realidad incluso más de lo que esperábamos en un principio.

## 6.1 Posibles líneas de acción para futuros proyectos

-Seguir 'jugando' con el modelo teórico, viendo la influencia que tendrían según éste algunos aspectos nuevos, como un diámetro de tubería más grande, la tubería de alimentación fabricada de otro material más o menos rígido,...

-Como teníamos pensado desde un principio, probar a caracterizar otras bombas de ariete.

-Modificar la válvula de choque de nuestra bomba de ariete, cambiando la actual válvula de clapeta por una de pie de pozo modificada, de forma que podamos variar manualmente el peso de la válvula, provocando que tarde más o menos en cerrarse, y así poder manejar algo las relaciones de caudales y rendimiento, escogiendo el peso más apropiado para cada montaje. Esta modificación nos ayudaría también a ampliar el rango de alturas de trabajo para las que la bomba podría funcionar sin que se cerrara definitivamente la válvula de choque, lo cual, como hemos comentado, es un problema en ciertas configuraciones actualmente.

-Llegar a alturas de elevación mayores, para las que según los resultados del modelo teórico se obtienen mayores rendimientos de la bomba. Esto podría conseguirse ampliando la longitud de la tubería de elevación más allá del segundo piso del edificio del laboratorio, o añadiendo una válvula que genere una pérdida de carga, simulando una altura mayor.

-Cambiar los tramos y codos actuales de la tubería de alimentación por piezas similares de acero galvanizado, y cuantificar las diferencias.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

1. LENCASTRE, A.; COUTINHO, A., *Manual de ingeniería hidráulica*. Universidad Pública de Navarra. 1998. ISBN 8495075164.
2. TULLIS, J. PAUL, *Hydraulics of pipelines: pumps, valves, cavitation, transients*. John Wiley. 1989. ISBN 0471832855.
3. POTTER, MERLE C.; WIGGERT, DAVID C., *Mecánica de fluidos*. Thomson. 2002. ISBN 9706862056.
4. CRESPO MARTÍNEZ, A., *Mecánica de fluidos*. Thomson Paraninfo. 2006. ISBN 9788497322928.
5. WEINMANN, P., *El ariete hidráulico: Teoría y práctica de un gran invento caído en desuso*. Weinmann Sondermaschinenbau GmbH. 2004. ISBN 3-00-013342-9.
6. URKIA, I.; URKIA, S., *Energía renovable práctica*. Editorial Pamiela -Taller de investigación alternativa- Navarra. ISBN 84-7681-375-9
7. WHITE, FRANK M., *Mecánica de fluidos*. McGraw Hill. 2008. ISBN 9788448166038.
8. IDELCHIK, I. E., *Handbook of hydraulic resistance*. CRC Press. 1994. ISBN 0849399084.
9. LANSFORD, W. M.; DUGAN, W. G., *An analytical and experimental study of the hydraulic ram*. University of Illinois Experiment Station, Bull. Ser. No. 326, 1941.
10. O'BRIEN, M. P.; GOSLINE, J. E., *The hydraulic ram*. Univ. Calif. Publications in Engineering, Vol. 3, No. 1, 1933.
11. NAJM, H. M.; AZOURY, P.H.; PIASECKI, M., *Hydraulic ram analisis: a new look at an old problem*. IMechE Proceedings, Part A, Issue A2, Vol 213, pp. 127-141, 1999.
12. YOUNG, B. W.; *Generic design of ram pumps*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers – Part A, Vol 212 Issue 2, p117, 1998.
13. *An introduction to hydraulic ram pumps*. University of Warwick, England.
14. TOBELLA ARREDONDO, J., *PFC: Diseño, montaje y ensayo de una bomba de mecate*. Universidad Carlos III de Madrid, 2011
15. ARROLLO FERNÁNDEZ-RAÑADA, J., *PFC: Diseño de un banco de ensayos de bombas manuales*. Universidad Carlos III de Madrid, 2006.

16. TOMILLO GUTIERREZ, U., PFC: Estudio acerca del empleo de la bomba manual de agua en el ámbito rural en países en vías de desarrollo. Universidad Carlos III de Madrid. 2005.

## 7.1 Páginas web consultadas:

[www.who.int/es](http://www.who.int/es)

[www.isf.es](http://www.isf.es)

[www.ongawa.org](http://www.ongawa.org)

[www.unesco.org](http://www.unesco.org)

[www.sphereproject.org/sphere/es](http://www.sphereproject.org/sphere/es)

[www.fao.org](http://www.fao.org)

[www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)

[www.terra.org](http://www.terra.org)

<http://regis.petit2.perso.sfr.fr/beliera.htm>

<http://es.scribd.com/doc/49729691/Bombas-de-ariete>

<http://escuelas.fi.uba.ar/iis/GOLPE%20DE%20ARIETE.pdf>

[www.car-show.de/widder.pdf](http://www.car-show.de/widder.pdf)

<http://williamsonrampump.co.nz>

[www.riferam.com](http://www.riferam.com)

[www.lifewater.ca/ram\\_pump.htm](http://www.lifewater.ca/ram_pump.htm)

[www.walton.fr/hydraulic-ram.html](http://www.walton.fr/hydraulic-ram.html)

[www.plastigama.com.ec/site/attachments/055\\_tuby\\_acc%20pvc\\_pe\\_bd.pdf](http://www.plastigama.com.ec/site/attachments/055_tuby_acc%20pvc_pe_bd.pdf)

## 8 ANEXOS

### 8.1 Fotografías de la instalación montada y funcionando

Imágenes de algunas configuraciones de montaje:



Figura 8-1 – Bomba de ariete instalada con 3 configuraciones diferentes de la tubería de alimentación.

Imagen de la salida de agua elevada por la bomba:

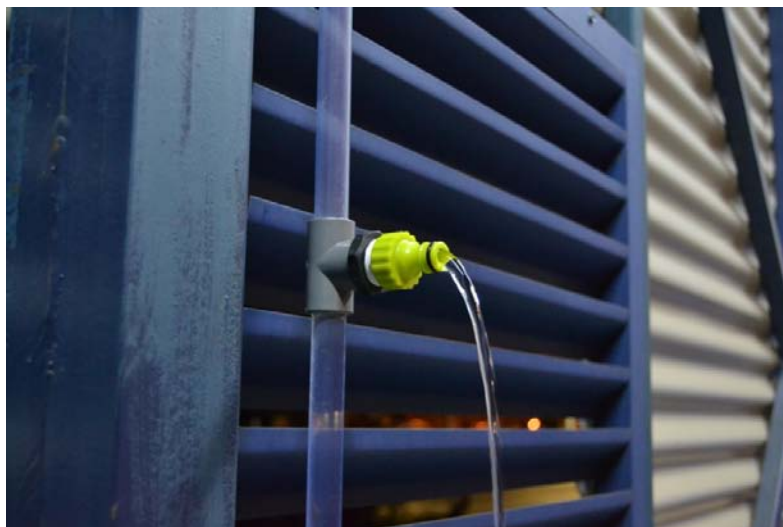


Figura 8-2 Salida de agua elevada a una altura  $h$  de 5 metros, con una altura de alimentación de  $H=1$

Imágenes de la bomba de ariete en pleno funcionamiento:

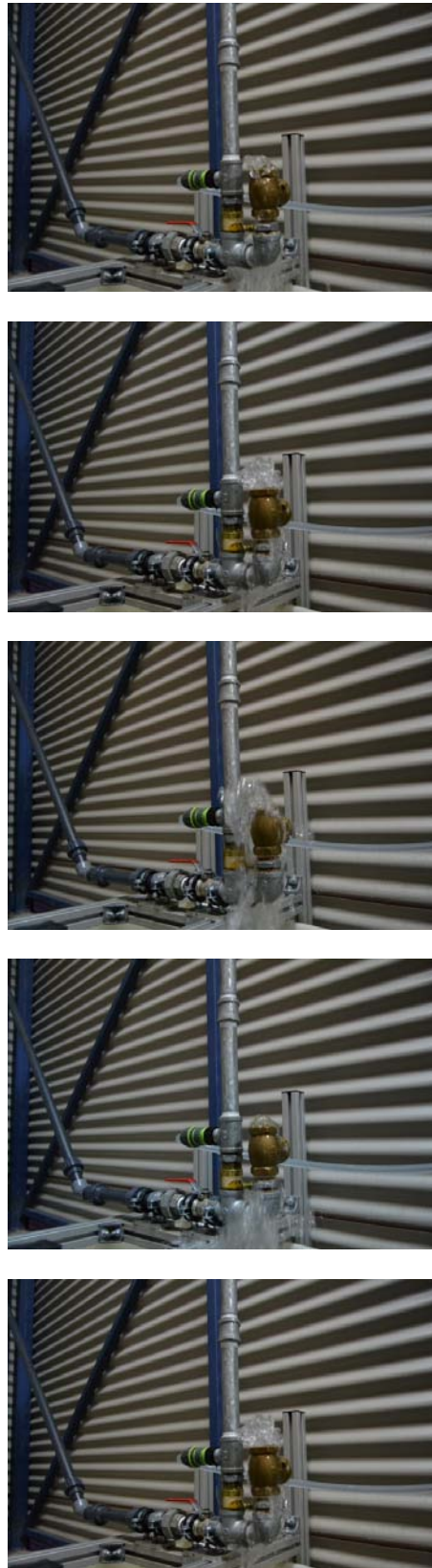


Figura 8-3 – El fluido sale por la válvula de choque a una velocidad cada vez mayor, hasta que la válvula se cierra de golpe. Pasado un pequeño instante, la válvula se abre sola y comienza el mismo ciclo indefinidamente.

## 8.2 Resultados gráficos obtenidos con MathCad

### 8.2.1 Resultados en función de la altura de alimentación, H:

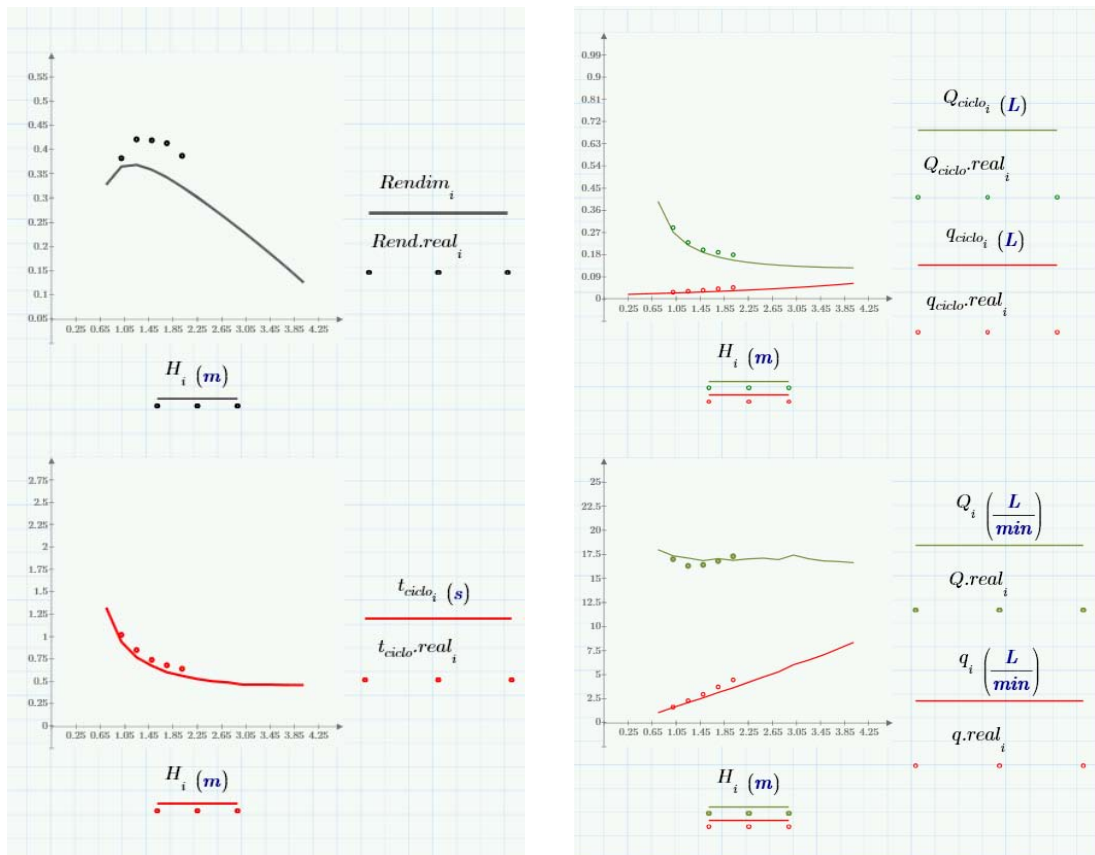


Figura 8-4 – Resultados teóricos y experimentales en función de la altura de alimentación, H



### 8.2.2 Resultados en función de la altura de elevación, h:

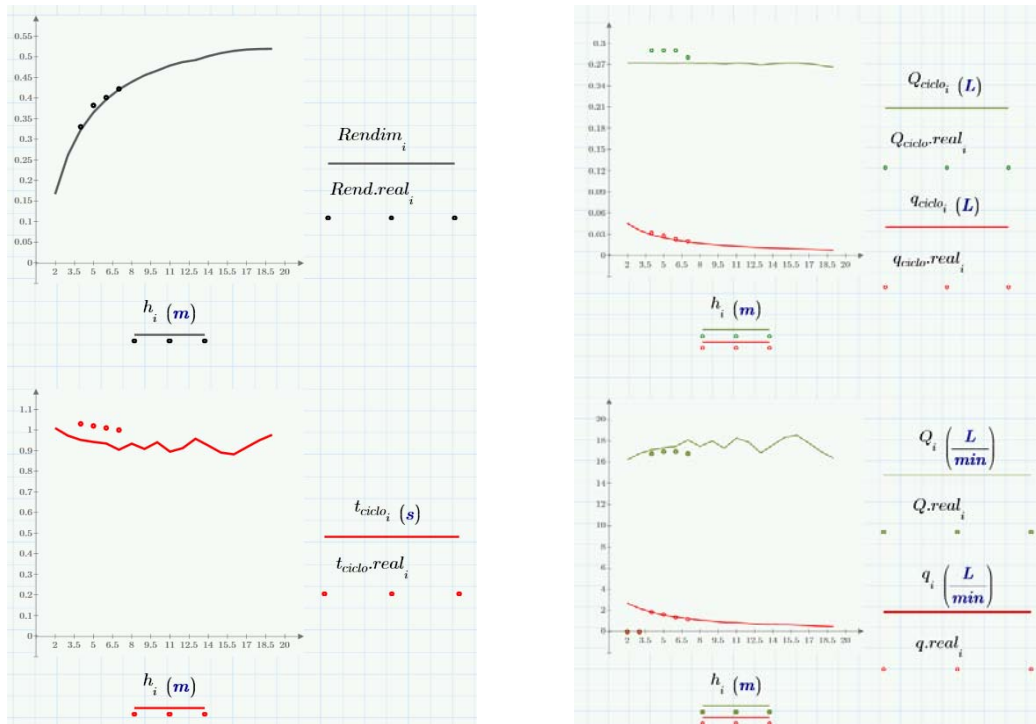


Figura 8-5 – Resultados teóricos y experimentales en función de la altura de elevación, h

### 8.2.3 Resultados en función de la longitud de la tubería de alimentación, L:

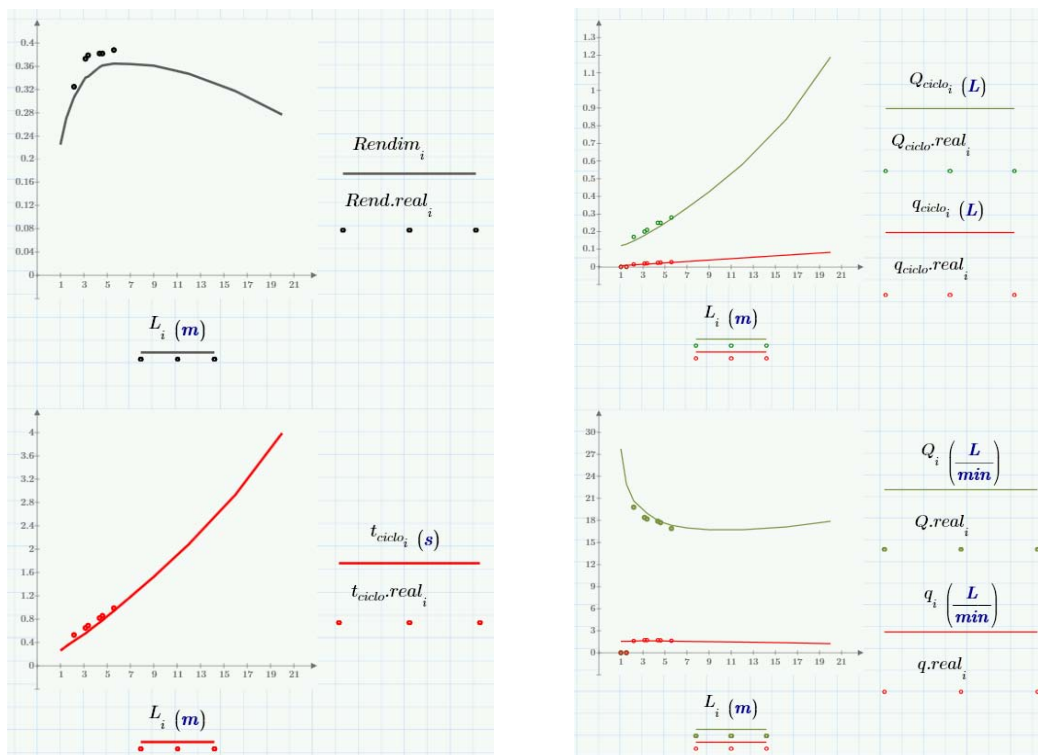


Figura 8-6 – Resultados teóricos y experimentales en función de la longitud de la tubería de alimentación, L