



Universidad
Zaragoza

Proyecto Fin de Carrera

Construcción, caracterización hidráulica y estudio de aplicación de una bomba de ariete para el riego de una finca agrícola

Autor

Javier Ortega Nebra

Director

César González Cebollada

Escuela Politécnica Superior de Huesca

2013

Agradecimientos

A mi familia y amigos por todo su apoyo y cariño

Indice

AGRADECIMIENTOS	3
INDICE	5
RESUMEN	11
1 - OBJETIVOS.....	15
2 - INTRODUCCIÓN	19
2.1 PRESENTACIÓN DEL PROYECTO	21
2.2 RESEÑA HISTÓRICA	22
2.3 ELEMENTOS COMPONENTES EN UNA INSTALACIÓN CON BOMBA DE ARIETE	25
2.4 ELEMENTOS COMPONENTES DE UNA BOMBA DE ARIETE.....	26
2.5 FUNCIONAMIENTO DEL ARIETE HIDRÁULICO.....	28
2.6 EL GOLPE DE ARIETE	31
2.6.1 Definición.....	31
2.6.2 Fundamento.....	31
2.6.3 Descripción del golpe de ariete.....	32
2.6.4 Tiempo de cierre de una válvula.....	38
2.6.5 Mecanismos para la prevención o mitigación del golpe de ariete.....	40
2.6.6 El golpe de ariete aplicado a la Ingeniería.....	40
2.6.7 Cálculo del golpe de ariete para el cierre brusco de una válvula.....	40
2.7 CICLO TEÓRICO DEL ARIETE HIDRÁULICO	42
2.7.1 Modelo de Krol.....	42
Periodo 1	44
Periodo 2	48
Periodo 3	51

Periodo 4	53
Periodo 5	56
Periodo 6	58
Periodo 7	59
2.8 DETALLES EN EL DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN CON BOMBA DE ARIETE.....	61
2.8.1 <i>La elección del lugar</i>	61
2.8.2 <i>Elección de la bomba de ariete</i>	65
Tipo de bomba de ariete.....	66
Número de bombas y tamaño de las mismas	68
2.8.3 <i>Sistema de conducción</i>	70
Depósito intermedio de alimentación.....	70
Tubería de impulso	71
2.8.4 <i>Sistema de entrega</i>	73
Tubería de descarga	73
Depósito de descarga.....	75
2.9 ARIETES HIDRÁULICOS COMERCIALES	76
2.9.1 <i>Green&Carter</i>	76
2.9.2 <i>Blake Hydram</i>	76
2.9.3 <i>Walton</i>	77
2.9.4 <i>Schlumpf</i>	77
2.9.5 <i>Zahner Metallbearbeitung</i>	78
2.9.6 <i>Wama Widder</i>	78
2.9.7 <i>Weinmann</i>	79
2.9.8 <i>Meribah Ram Pump</i>	79
2.9.9 <i>Rife Hydraulic Engine</i>	80

2.9.10 Centragua	80
2.10 DOS EJEMPLOS DE BOMBAS DE ARIETE EN HUESCA.....	81
2.10.1 Bomba de ariete en Belsué.....	81
2.10.2 Bomba de ariete en Siétamo	84
3 - METODOLOGÍA	89
3.1 CONSTRUCCIÓN DE LA BOMBA DE ARIETE	91
3.1.1 Diseño de la bomba de ariete	92
3.1.2 Tamaño del ariete hidráulico	92
3.1.3 Partes del ariete hidráulico construido.....	93
Cuerpo de la bomba de ariete	93
Válvula de impulso	94
Válvula de descarga	97
Calderín o cámara de aire	98
3.2 CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA DE LA BOMBA DE ARIETE.....	100
3.2.1 Diseño y montaje de la instalación.....	100
Depósito de alimentación	100
Tubería de impulso	101
Bomba de ariete	102
Tubería de descarga	103
3.2.2 Técnica de medida empleada en la caracterización hidráulica.....	104
3.2.3 Procedimiento realizado durante la caracterización hidráulica	105
4 - RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	107
4.1 EFECTO DE LA VÁLVULA DE IMPULSO EN EL COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA DE ARIETE.....	109
4.1.1 Válvula de impulso mediante la modificación de una válvula no retorno tipo York.....	109

4.1.2	<i>Válvula de impulso con una válvula no retorno tipo clapeta</i>	109
4.1.3	<i>Válvula de impulso mediante la modificación de una válvula no retorno tipo Kent</i>	110
4.2	EFFECTO DE LA ALTURA DE ELEVACIÓN	112
4.2.1	<i>Resultado experimental</i>	112
4.2.2	<i>Resultado teórico: Análisis teórico del golpe de ariete</i>	114
4.2.3	<i>Discusión</i>	115
	Fallo en la válvula de impulso	116
	Cierre lento de la válvula de impulso	116
	Baja sobrepresión producida en el cuerpo del ariete	117
	Bomba de ariete casera	117
5	- APLICACIÓN DE UNA BOMBA DE ARIETE A UNA FINCA AGRÍCOLA	119
5.1	CONSIDERACIONES PREVIAS	121
5.2	LOCALIZACIÓN DEL LUGAR A INSTALAR	123
5.2.1	<i>Suministro de agua para la instalación</i>	125
5.2.2	<i>Lugar de descarga</i>	126
5.3	CÁLCULO TEÓRICO	128
5.3.1	<i>Cálculo teórico para la Parcela 1</i>	130
5.3.2	<i>Cálculo teórico para la Parcela 2</i>	131
5.4	ESTUDIO COMPARATIVO CON UNA BOMBA CONVENCIONAL	134
5.4.1	<i>Selección de la bomba convencional</i>	134
5.4.2	<i>Cálculo teórico</i>	135
5.4.3	<i>Bomba de ariete vs bomba de gasolina</i>	137
6	- CONCLUSIONES	139
	BIBLIOGRAFÍA	143

ANEXO I.....	149
PROCEDIMIENTO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA BOMBA DE ARIETE	151
ANEXO II.....	159
PROCEDIMIENTO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA VÁLVULA DE IMPULSO PARTIENDO DE UNA VÁLVULA NO TIPO YORK	161
ANEXO III.....	171
PROCEDIMIENTO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA VÁLVULA DE IMPULSO PARTIENDO DE UNA VÁLVULA NO RETORNO TIPO KENT	173
ANEXO IV	181
PRESUPUESTO	183

RESUMEN

La bomba de ariete es un sistema de impulsión que aprovecha la energía potencial gravitatoria del agua para la elevación de una porción de la misma, mediante la transformación de la energía potencial, primero, en energía cinética y posteriormente en ondas de presión, conocidas como golpes de ariete.

La bomba de ariete ha estado en desuso en los países desarrollados durante el siglo XX, debido a los bajos costes de la electricidad y de los combustibles fósiles. Por otra parte, su campo de aplicación es limitado, ya que requiere una cantidad excedentaria de agua capaz de ceder su energía potencial al agua impulsada.

No obstante, la bomba de ariete continúa presente, ya sea en países en vías de desarrollo o bien en determinados usos agrícolas a pequeña escala en países desarrollados, donde se suele utilizar por razones de sensibilidad ambiental, o también por ahorro de costes energéticos, siempre en lugares donde se puedan dar las condiciones apropiadas.

Por ello, desde el documento que tienes entre tus manos se ha realizado un trabajo de consulta bibliográfica sobre el funcionamiento y los aspectos relacionados con las bombas de ariete, además de construir y caracterizar hidráulicamente un prototipo realizado mediante piezas de fontanería, para después estudiar teóricamente su aplicación al riego de una finca agrícola.

1 - OBJETIVOS

Objetivos generales:

- Estudio y aplicación de energías no dependientes de la energía fósil así como de la energía eléctrica.
- Rescatar del rincón del olvido las bombas de ariete.

Objetivos específicos:

- Revisión bibliográfica del “estado del arte” científico y tecnológico acerca de las bombas de ariete.
- Construcción de una bomba de ariete.
- Caracterización hidráulica de la bomba de ariete construida.
- Estudio comparativo de aplicación al riego de una finca agrícola.

2 - INTRODUCCIÓN

2.1 Presentación del Proyecto

La bomba de ariete, también conocida como ariete hidráulico, hydram o ram pump, aprovecha la energía hidráulica ocasionada de un pequeño desnivel para elevar agua a una altura superior, sin usar, para ello, electricidad o combustible alguno. De este modo, esta bomba de impulsión toma el agua de un depósito, acequia o río situado a una altura ligeramente superior, aprovechando la energía cinética que induce el propio fluido al discurrir por una tubería hasta el cuerpo de la misma para provocar una sobrepresión ocasionada por la apertura y cierre continuo de una válvula. Esta sobrepresión producida se denomina golpe de ariete y es el principio básico para su funcionamiento.

La bomba de ariete no es un invento actual sino que pertenece al conjunto de herramientas que han sido relegadas, en muchos casos, a piezas de colección, mostradas en museos como mero recuerdo de lo que hace un tiempo no tan lejano significaron para el desarrollo de los pueblos. De este modo, observamos como norias, ruedas o arietes hidráulicos, entre otros muchos, fueron sistemas de bombeo muy extendidos y de gran éxito que con la irrupción de la corriente eléctrica y la bomba centrífuga fueron cayendo poco a poco en desuso, debido a la mayor eficiencia de estas últimas.

Esta situación de omnipresencia que durante este último siglo han disfrutado los sistemas de bombeo eléctricos y de combustión interna ha llevado a un desarrollo de éstos magnífico, coincidente con el esplendor de las nuevas tecnologías, lo que ha provocado el abandono de los sistemas tradicionales así como de su investigación en busca de máquinas más eficientes de las que existían antiguamente, bien fabricándolas con otros materiales o bien añadiendo nuevos elementos que permitiesen un mayor rendimiento.

Sin embargo, en los últimos años, se ha suscitado un interés creciente en los dispositivos de energía renovable, debido no sólo a una mayor concienciación social, sino a los actuales precios del petróleo y de la electricidad que conllevan a que existan sistemas de riego de última generación infrautilizados.

Por ello, desde el presente Proyecto Final de Carrera, queremos aportar nuestro granito de arena para recordar que existen sistemas de bombeo que, en determinadas circunstancias, se pueden amoldar a nuestras necesidades con un coste mucho menor tanto para nosotros como para *nuestra* Tierra, que tan debilitada se encuentra a comienzos del siglo XXI.

2.2 Reseña histórica

La primera bomba de ariete conocida se atribuye al inglés John Whitehurst en 1772. Este ilustre personaje experimentaba con el agua que fluía rápidamente por los tubos, y en su cervecería, ubicada en el condado de Cheshire, inventó una máquina muy rudimentaria, la cual era accionada manualmente. Este hydram, al que denominó “pulser pump” estaba accionado por un grifo en una tubería conectada a un tanque de abasto, en un nivel superior, para provocar el fenómeno físico conocido como golpe de ariete, el cual le permitió elevar el líquido a un tanque de almacenamiento colocado a 4.9 metros de altura.

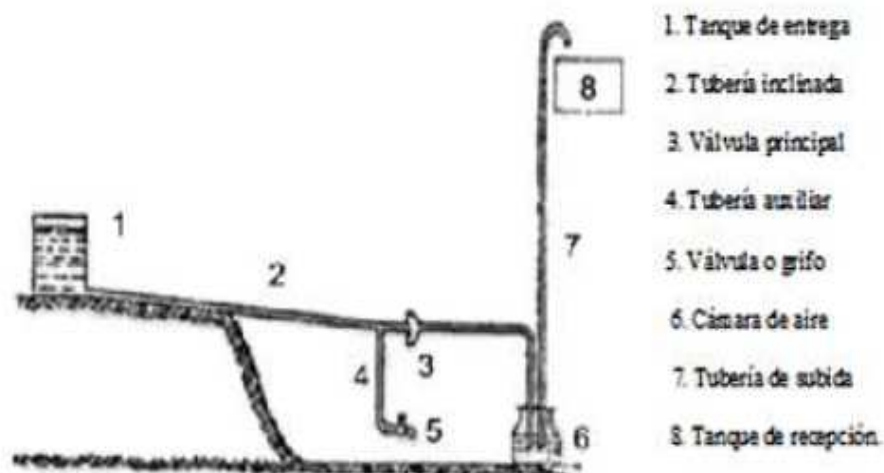


Figura 2.1. Diseño del “pulser pump” de John Whitehurst
[Fuente: <http://www.cubasolar.cu>, revisada en Abril de 2013]

Unos años después, en 1776, la sagacidad humana añadió elementos al invento de John Whitehurst y se fabricó el primer ariete hidráulico autoactivante de la mano de los hermanos Montgolfier, cuya mejora consistía en que ya no se necesitaba de ninguna fuerza externa para abrir la válvula de impulso, sino que era la propia fuerza inherente del agua la que se encargaba de realizar esa tarea. A este nuevo prototipo le denominó “belier hydraulique”.

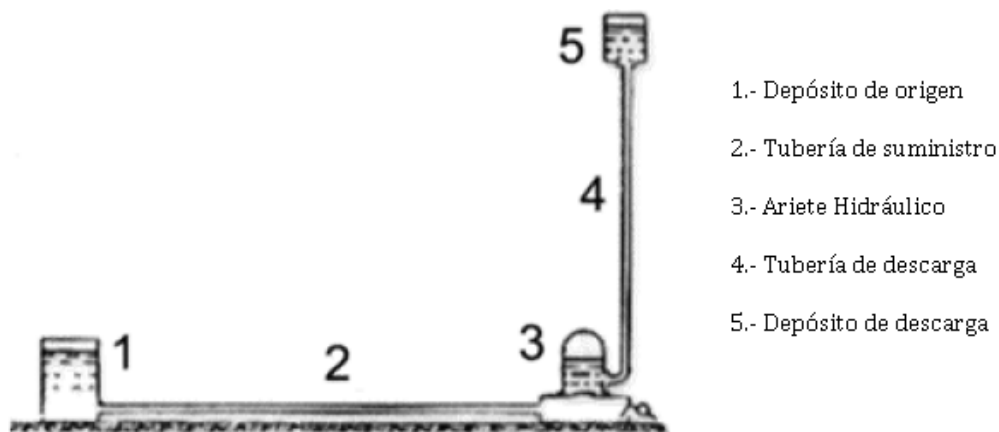


Figura 2.2. Diseño del “belier hydraulique” de los hermanos Montgolfier
[Fuente: <http://www.cubasolar.cu>, revisada en Abril de 2013]

Después de la muerte del célebre francés, no fueron pocas las voces que se ocuparon de añadir bondades al invento e investigaron los secretos de su aparente magia.

El trabajo de Joseph Montgolfier fue mejorado por su hijo, François, quien en 1816 diseñó una válvula para introducir aire en la cámara del ariete hidráulico con la intención de mejorar el rendimiento, llegando a bombear agua a 48 metros de altura.

En 1820, la patente pasó a las manos de Easton Company, siendo la primera empresa en fabricar bombas de ariete a escala comercial usados para el abastecimiento de agua en comunidades, granjas o en otros lugares como las fuentes del Taj Mahal o el Ameer de Afganistán.

Era un tiempo donde la gasolina se encontraba en pequeñas botellas en las boticas, faltaba mucho tiempo para que hubiera corriente eléctrica y la máquina de vapor acababa de empezar a andar, por lo que el ariete hidráulico tuvo una amplia difusión por todo el mundo.

Esta situación provocó que investigadores experimentaran con el invento y formularan hipótesis para intentar describir el proceso de funcionamiento. Eytelwein, en 1805; d'Aubuisson, en 1840 y Morin, en 1863, aportaron deducciones empíricas que aún persisten en trabajos de referencia, aunque fueron criticados por técnicos de la época debido a que no reflejaban su verdadera complejidad.

El problema se encontraba en que el principio de funcionamiento, el golpe de ariete, no estaba definido aún, ya que científicos europeos habían observado su impacto en conducciones de tuberías pero no sabían describir su proceso.

Fue en 1889, cuando un científico ruso, N. Zhukovsky, detalló la teoría del fenómeno del golpe de ariete, suponiendo la base para la mejora y el conocimiento, así como el desarrollo de las bombas de ariete.

La fusión de la teoría y la práctica aportaron las claves cognitivas: desde Harza, en 1908, con el diseño de un equipo experimental accionado por un motor externo para determinar el caudal inestable durante el período de aceleración; O'Brien y Gosline, en 1933, quienes contribuyeron a dar una primera explicación satisfactoria para el funcionamiento del ariete; Lansford y Dugan, en 1941, que obtuvieron informaciones atendibles; Krol, en 1951, quien formuló un ciclo teórico para el funcionamiento del ariete hidráulico; o el modelo de Iversen, en 1975; hasta recientes indagaciones como las realizadas por Schiller y Kahangire en la Universidad de Ottawa; el belga Jan Haemhouts, desde 1989 a 1998, e investigadores cubanos desde la década del noventa del pasado siglo.

Pero con el paso de los años, el boom del petróleo, la consolidación de la

industria moderna y el avance arrollador de la bomba centrífuga fue desapareciendo el interés por las bombas de ariete hasta hoy en día que se usan de forma anecdótica en algunos proyectos, sobretodo, en países en vías de desarrollo, donde las personas que allí habitan no suelen tener acceso fácil ni a la electricidad ni a los combustibles.

Sin embargo, lo que más se recuerda de la era victoriosa de los arietes hidráulicos es el escaso mantenimiento que requerían y su vida útil, lo que hubiera permitido satisfacer ciertos mercados por varias décadas (en Ameya, Nicaragua, se encuentra una bomba de ariete funcionando desde 1884).

Este argumento tampoco favorece el desarrollo de esta tecnología en el mundo mercantilista, donde el buen negocio consiste fundamentalmente en seguir vendiendo, aunque sea sobre la base de la manipulación de las necesidades reales de las personas.

2.3 Elementos componentes en una instalación con bomba de ariete

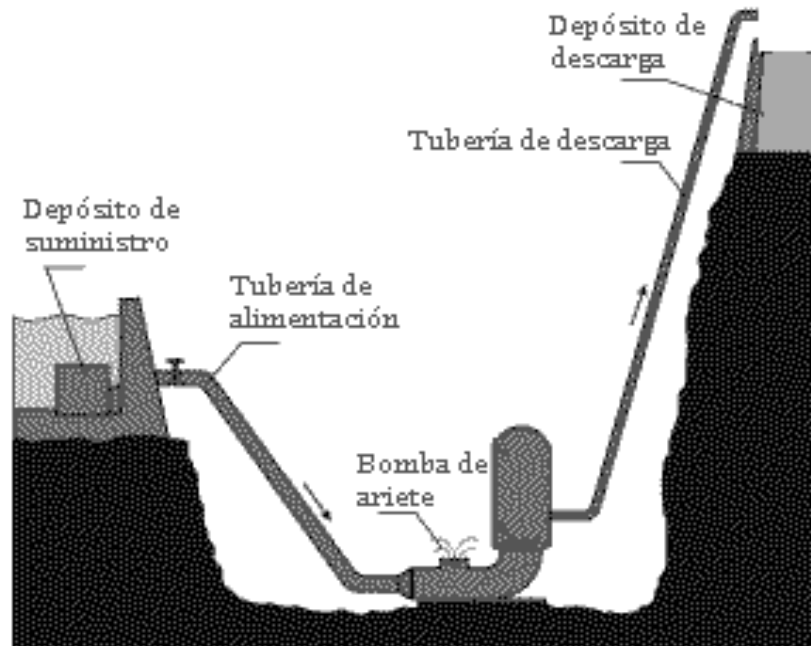


Figura 2.3. Elementos componentes en una instalación con bomba de ariete
[Fuente: Ramón Chamba y Vallejo Herrera (2005)]

Los componentes que nos vamos a encontrar en una instalación con bomba de ariete tienen que ser los siguientes, para que el funcionamiento sea el correcto y el agua fluya al depósito de descarga de una forma cuasi-continua.

- Depósito de suministro, río o acequia: lugar de donde se va a proceder a recolectar el agua para trasladar parte de ella a otro lugar de mayor cota.
- Tubería de alimentación o de suministro: conecta el suministro de alimentación con el ariete hidráulico y constituye uno de los elementos fijos más importantes.
- Bomba de ariete.
- Tubería de descarga: Tubería que va a conducir el agua desde el ariete hidráulico hasta el depósito final de almacenamiento.
- Depósito de descarga: Lugar de almacenamiento de agua para luego ser aprovechada para el uso que le corresponda (irrigación, consumo de agua para una casa o aldea, granja... etc.)

Cada uno de estos elementos deben poseer unas características propias dependiendo del lugar donde se pretende instalar el ariete hidráulico y de las necesidades que se tengan, con la finalidad de obtener la máxima eficiencia posible.

2.4 Elementos componentes de una bomba de ariete

El cuerpo del ariete es estructuralmente simple y suele estar constituido, sobre todo en los casos de bombas de ariete comerciales, por una unidad ensamblada cuyos elementos pueden estar unidos por pernos, tornillos o mediante soldadura.

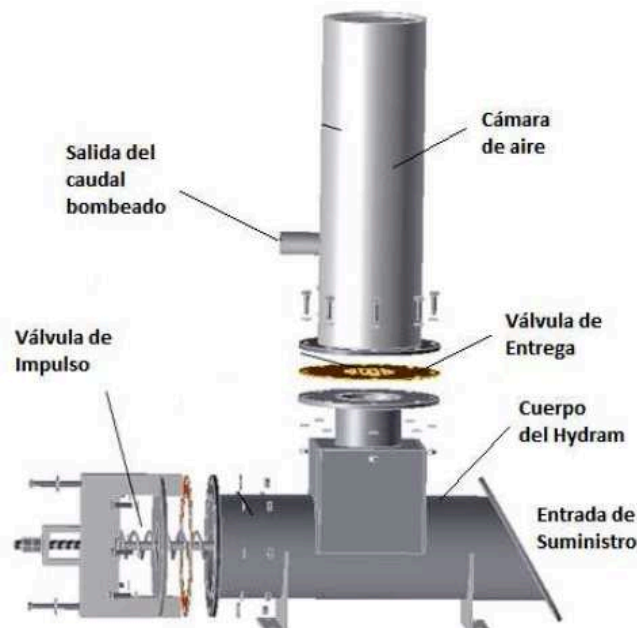


Figura 2.4. Despiece de una bomba de ariete ensamblada por tornillos
[Fuente: Campaña Calero y Guamán Alarcón (2011)]

A su vez, el ariete consta de una serie de elementos que vamos a describir a continuación y podemos observar en la figura anterior:

- Válvula de impulso: pieza, probablemente, más importante de la bomba de ariete, sin restar a las demás su respectiva transcendencia, debido a que va a ser la encargada de producir el golpe de ariete como consecuencia al cierre brusco que se produce por el efecto del incremento de la velocidad del agua.
- Válvula de descarga o check: se trata de una válvula no retorno que comunica el cuerpo del ariete hidráulico con la tubería de descarga y la cámara de aire. Su apertura se produce como consecuencia de la sobrepresión ocasionada, permitiendo el paso del fluido hacia el depósito de descarga pero no su retorno hacia el hydrám.
- Cuerpo de la bomba de ariete: lugar donde se produce la inversión de la onda de presión y donde se ubican las válvulas de impulso y de descarga, y a su vez base de asientos y de ubicación de los elementos del ariete.

- Cámara de aire o calderín: dispositivo que regula el flujo de agua hacia la tubería de descarga, absorbiendo la sobrepresión (funciona como amortiguador de los golpes de ariete) e impulsando el agua por la tubería de descarga, dando de esta forma, un flujo casi continuo.
- Válvula de admisión de aire (opcional): sirve para renovar el aire absorbido por el agua cuando la bomba se encuentra en funcionamiento.

2.5 Funcionamiento del ariete hidráulico

En un principio, la válvula de impulso se encuentra abierta como consecuencia del propio peso que la mantiene en esa posición, mientras que la válvula de descarga se encuentra cerrada.

Desde la fuente de suministro el agua fluye por la tubería de alimentación, mientras va adquiriendo una aceleración, atravesando el cuerpo del ariete y escapando a través de la válvula de impulso.

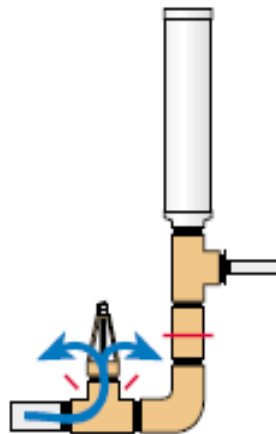


Figura 2.5. Funcionamiento del ariete hidráulico
[Fuente: Lee (2000)]

A medida que transcurre un pequeño periodo de tiempo, el agua que circula por la tubería de alimentación alcanza cierta aceleración suficiente para que la presión dinámica del fluido actúe sobre la válvula de impulso, venciendo su propio peso, y la cierre.

Esta interrupción del flujo de agua produce una sobrepresión instantánea de gran empuje, conocida como golpe de ariete, que obliga a abrir la válvula de descarga o válvula check, entrando el flujo de agua hacia el calderín, comprimiendo el aire que ahí se encuentra.

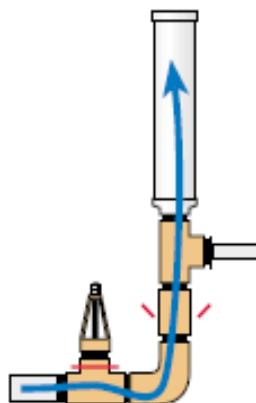


Figura 2.6. Funcionamiento del ariete hidráulico
[Fuente: Lee (2000)]

Una vez disipada la sobrepresión generada en el calderín, y por lo tanto igualada la presión a uno y a otro lado de la válvula antirretorno, el aire comprimido actúa como una especie de muelle, transmitiendo al fluido la presión que se ha acumulado en el aire de la cámara, provocando el cierre de la válvula check y el bombeo del agua a través de la tubería de descarga.

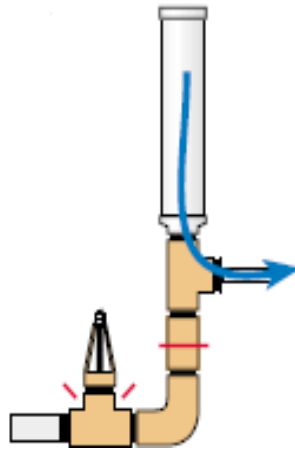


Figura 2.7. Funcionamiento del ariete hidráulico
[Fuente: Lee (2000)]

Cuando la presión del aire, en la cámara, aumenta hasta ser igual o mayor que la fuerza impulsora ocurre el retroceso de agua cerrando la válvula de descarga y abriendo la válvula de impulso, con lo que se repite de nuevo el ciclo.

El retroceso del agua permite la inyección de aire por medio de la válvula de aire, con el fin de compensar el aire absorbido por el agua.

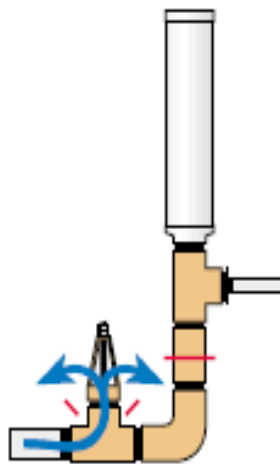


Figura 2.8. Funcionamiento del ariete hidráulico
[Fuente: Lee (2000)]

El ciclo de bombeo del ariete hidráulico ocurre de forma muy rápida, repitiéndose este fenómeno del orden de 40 a 120 veces por minuto (Jeffery *et al.* 1992).

Durante cada ciclo sólo un pequeño volumen de agua logra alcanzar el

depósito de descarga como consecuencia de que mucha cantidad de fluido escapa a través de la válvula de impulso. Sin embargo, ciclo tras ciclo, las 24 horas diarias, los 365 días del año, hace que el caudal elevado sea significativo.

2.6 El golpe de ariete

2.6.1 Definición

Fue descrito por primera vez por Zhukovsky en 1889 y lo definió como la variación de la presión en los conductos de agua, provocada por el aumento o la disminución brusca de la velocidad del líquido.

En las instalaciones de puesta en marcha y parada de las bombas, así como en la apertura y cierre de válvulas, y en general en toda variación que pueda originarse en la velocidad de circulación de agua en una instalación, se produce este fenómeno originando una serie de sobrepresiones y depresiones alternativas, que se van amortiguando con el tiempo.

En el momento en el que se acciona una válvula de una tubería que contiene un líquido sometido a una presión, se altera la velocidad del mismo en la sección contigua al dispositivo, y se provoca una transformación de energía cinética a energía de presión. Esto implica la aparición de presiones locales distintas a las que había antes de la perturbación.

Por ello, es necesario el análisis correcto del golpe de ariete en tuberías para su óptimo dimensionado, en cuanto a timbrajes se refiere, pues un error en el mismo nos puede conducir a dos situaciones distintas: por un lado, el sobredimensionamiento y consecuentemente el encarecimiento de la instalación; o por el otro, el cálculo de la tubería por defecto con el consiguiente peligro de rotura.

2.6.2 Fundamento

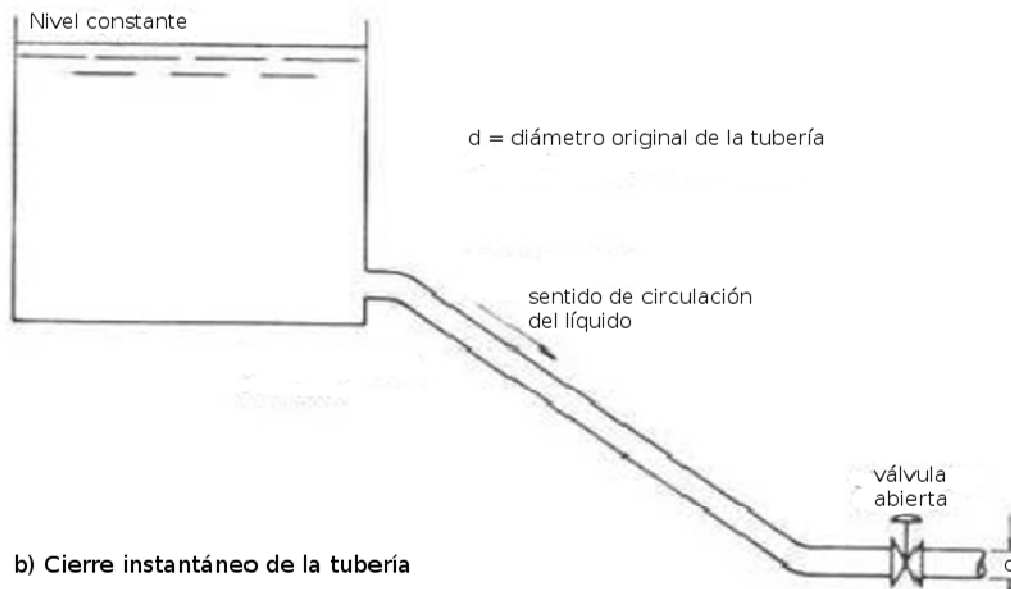
Si imaginamos una tubería que al final dispone de una válvula y cuyo cierre se puede realizar a gran velocidad, podemos observar como en condiciones normales el líquido circula a caudal y velocidad constante (siempre y cuando el nivel del depósito permanezca invariable y la tubería no sufra alteración alguna, así como su diámetro se mantenga durante toda su longitud).

Ahora bien, si accionamos de manera repentina el cierre de la válvula (a gran velocidad) las partículas de agua que se han detenido son empujadas por las que vienen inmediatamente detrás y que aún siguen en movimiento. Esto origina una sobrepresión que se desplaza por la tubería a una velocidad muy elevada. Esta sobrepresión tiene dos efectos: comprime ligeramente el agua, reduciendo su volumen, y dilata ligeramente la tubería. Mientras, a partir de la válvula se crea una depresión como consecuencia del cierre de ésta, que provoca una contracción de las paredes del conducto, transmitiéndose de ahí en adelante y volviendo a su diámetro original una vez que se ha evacuado el

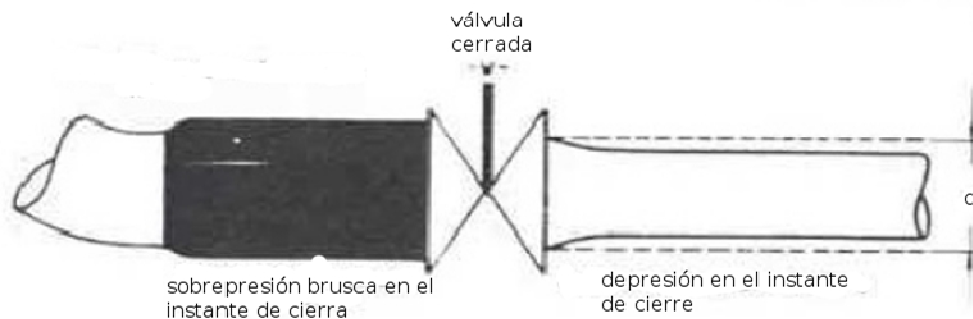
líquido por completo.

Además de las deformaciones motivadas por las sobrepresiones y depresiones mencionadas, se presentan vibraciones y otros efectos perjudiciales que pueden ocasionar roturas, aplastamientos y otros desperfectos en las tuberías y sus equipos, tales como anclajes, válvulas, etc.

a) Circulación del líquido con la válvula abierta



b) Cierre instantáneo de la tubería



Por ello, para el proyectista es de trascendental importancia el estudio del posible golpe de ariete existente en cada conducción, basándose en cálculos de gran complejidad, al objeto de obtener el diseño correcto de la misma, el asentamiento adecuado de los elementos de cierre y aquellos otros dispositivos que contrarresten, dentro de lo posible, los efectos perjudiciales debidos a maniobras inadecuadas, que pudieran acarrear gravísimas consecuencias.

2.6.3 Descripción del golpe de ariete

Como se verá a continuación, el golpe de ariete consiste en la transformación de la energía cinética del líquido en energía elástica que almacena tanto el

fluido como las propias paredes de la tubería.

La instalación que poseemos está compuesta por un depósito, una válvula y una tubería de longitud L y diámetro D por la que circula un caudal Q determinado a una velocidad constante u . Mientras que el resto de la instalación, válvula abajo, no es necesario conocerla debido a que no va a influir directamente en el caso que vamos a detallar.

En la situación inicial, la válvula se encuentra abierta y por la tubería circula un caudal a una determinada velocidad y presión constantes, suponiendo que el nivel del depósito, h , también lo es.

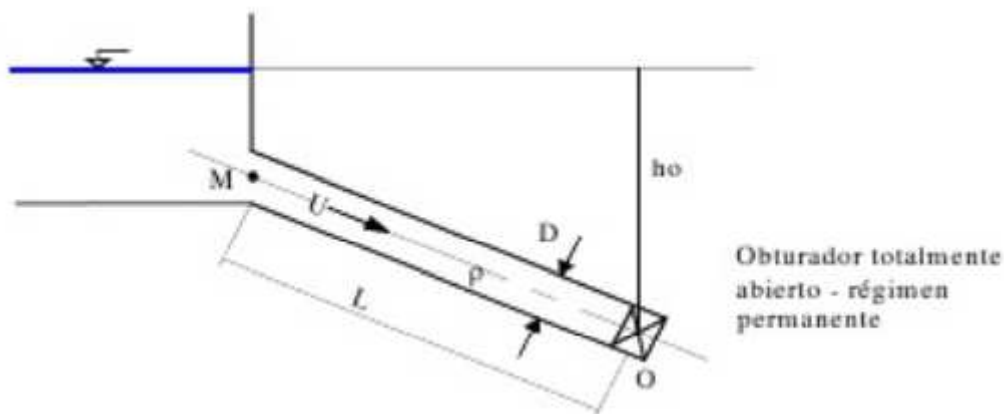


Figura 2.9. Descripción del golpe de ariete
[Fuente: Pérez y Guitelmán (2005)]

En un determinado momento ($t = 0$), se cierra la válvula situada en el punto O, por lo que el volumen de agua más cercano a dicho punto se comprime fuertemente contra la válvula cerrada, incrementándose la presión, h' , como consecuencia de la compresibilidad del fluido, y deformándose elásticamente, a su vez, la pared de la tubería. Este efecto permite que el resto del líquido que se encuentra en la tubería no acuse inmediatamente el cierre de la válvula y continúe moviéndose hacia ésta a velocidad u . Por lo tanto, la presión total en el extremo más cercano al punto O de la tubería es $H (h+h')$ y la velocidad en ese tramo se anula como consecuencia del cierre repentino.

Este cierre instantáneo de la tubería provoca una onda de propagación, celeridad de onda c , la cual se propaga en sentido contrario a la velocidad del fluido, siendo función de la compresibilidad del fluido y de la elasticidad de la pared de la tubería de la instalación.

Esta onda de propagación se origina, como hemos visto anteriormente, en el punto O como consecuencia del cierre instantáneo de la válvula y va a propagarse por la tubería hasta llegar al depósito, donde se refleja, vuelve en sentido contrario hacia la válvula, para volver posteriormente hacia el depósito y así sucesivamente, creando sobrepresiones y depresiones a lo largo de la tubería, la cual se dilata y se contrae con el paso de la onda (Ramón Chamba y

Vallejo Herrera, 2005).

En este instante, aguas arriba de la válvula, el fluido se va comprimiendo desde el punto O hacia el punto M , con una velocidad constante c , provocando una sobrepresión h' a lo largo de la tubería y anulando la velocidad.

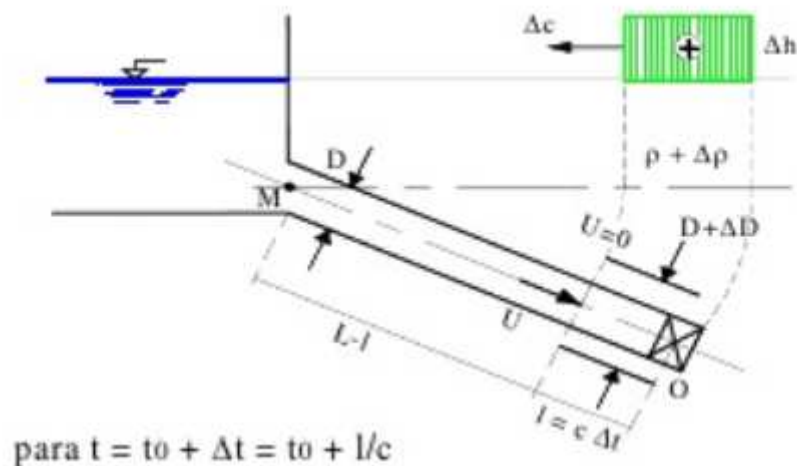


Figura 2.10. Descripción del golpe de ariete
[Fuente: Pérez y Guitelmán (2005)]

La onda de presión c llega al punto M ($t_0 = \frac{L}{c}$), base del depósito, y toda la tubería se encuentra en reposo ($u = 0$), pero no en equilibrio, quedando el agua comprimida en su interior a una presión H ($h+h'$).

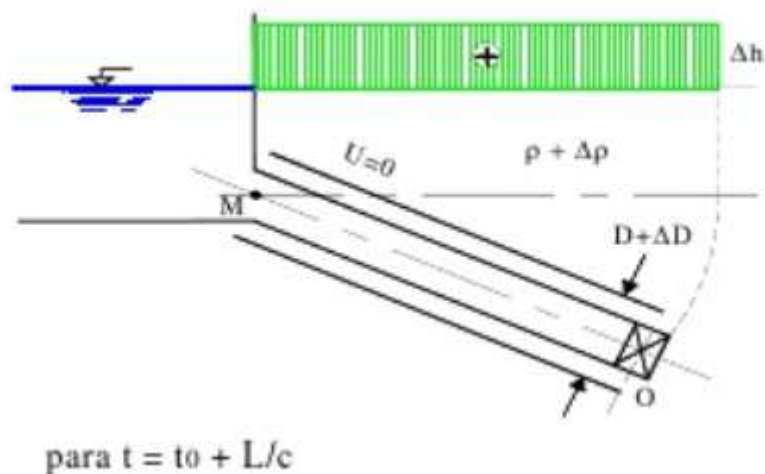


Figura 2.11. Descripción del golpe de ariete
[Fuente: Pérez y Guitelmán (2005)]

Cuando toma contacto con la base del depósito, la onda de propagación rebota y se dirige en sentido contrario hacia el punto O , mientras que el líquido contenido en la tubería se desplaza a una velocidad u en sentido contrario al anterior. De esta manera, la tubería se va contrayendo a su diámetro correspondiente conforme la onda va propagándose hacia el punto O .

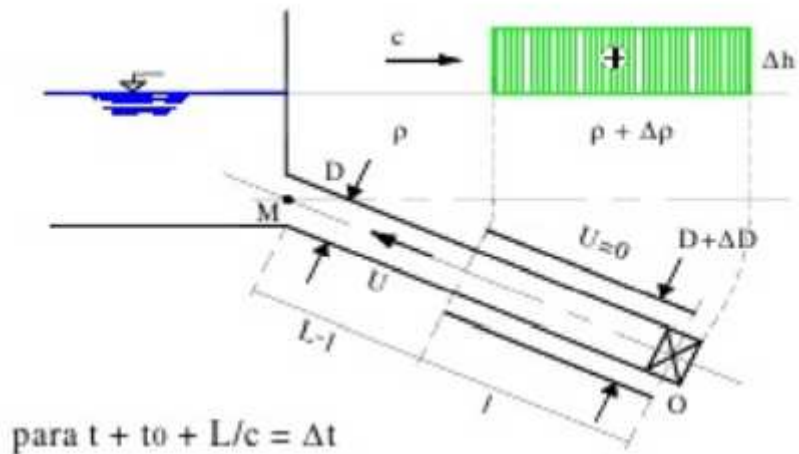


Figura 2.12. Descripción del golpe de ariete
[Fuente: Pérez y Guitelmán (2005)]

Una vez que llega la onda de presión c al punto O ($2t_0 = \frac{2L}{c}$) toda la tubería recupera su diámetro normal, mientras que el fluido contenido sigue desplazándose hacia el depósito con una velocidad u .

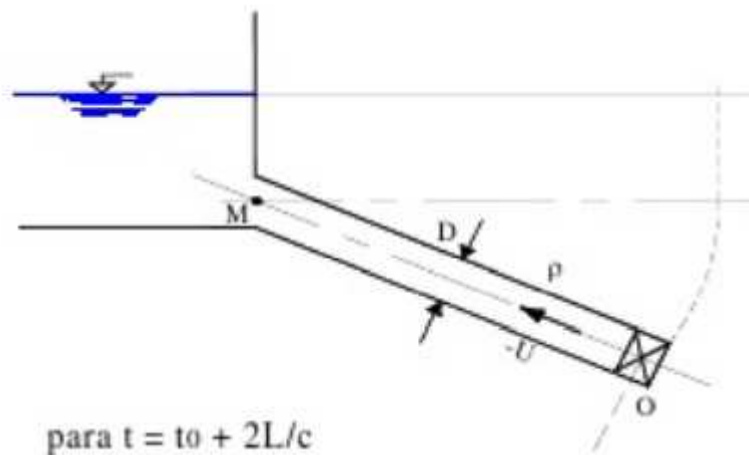


Figura 2.13. Descripción del golpe de ariete
[Fuente: Pérez y Guitelmán (2005)]

Como la tubería recupera su diámetro, no hay sobrepresión alguna, pero debido a la inercia, la presión continúa disminuyendo y la onda continúa propagándose desde la válvula hacia el depósito con velocidad c , por lo que el diámetro va disminuyendo por debajo del diámetro normal.

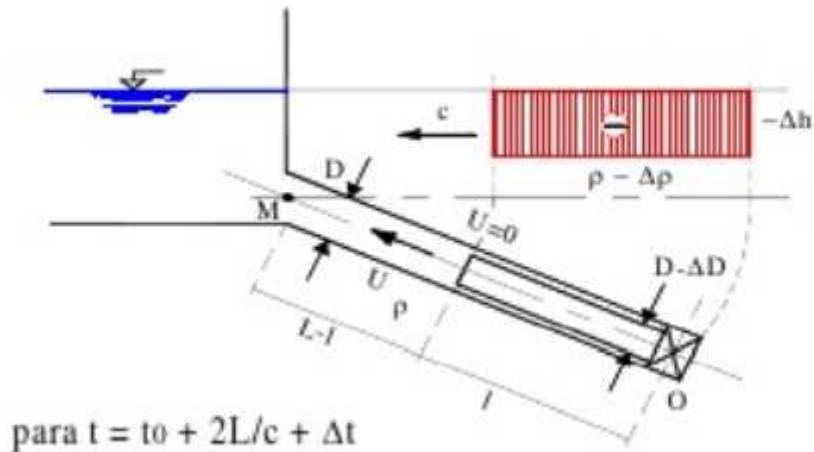


Figura 2.14. Descripción del golpe de ariete
[Fuente: Pérez y Guitelmán (2005)]

Al llegar la onda al depósito ($3t_0 = \frac{3L}{c}$), el agua en está en reposo, pero no en equilibrio. La depresión reina en toda la tubería y, por lo tanto, el diámetro de toda la tubería es inferior al normal.

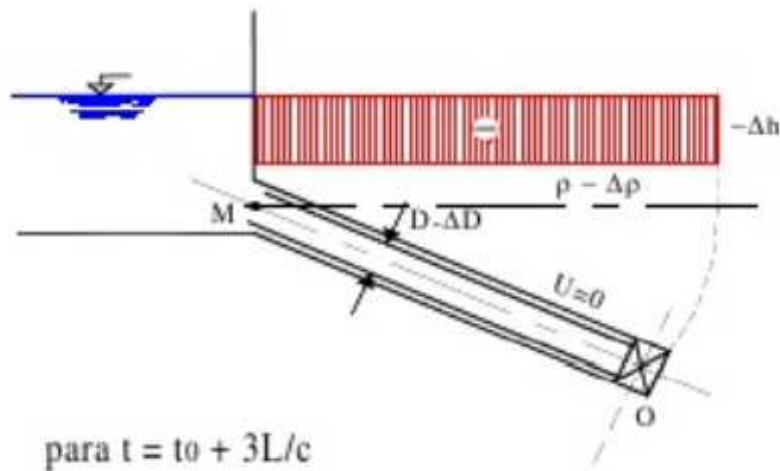


Figura 2.15. Descripción del golpe de ariete
[Fuente: Pérez y Guitelmán (2005)]

El agua inicia su movimiento desde el depósito hacia la válvula y la tubería va recuperando su diámetro normal, mientras que en los aledaños más próximos a la válvula la tubería sigue en depresión y el líquido en reposo.

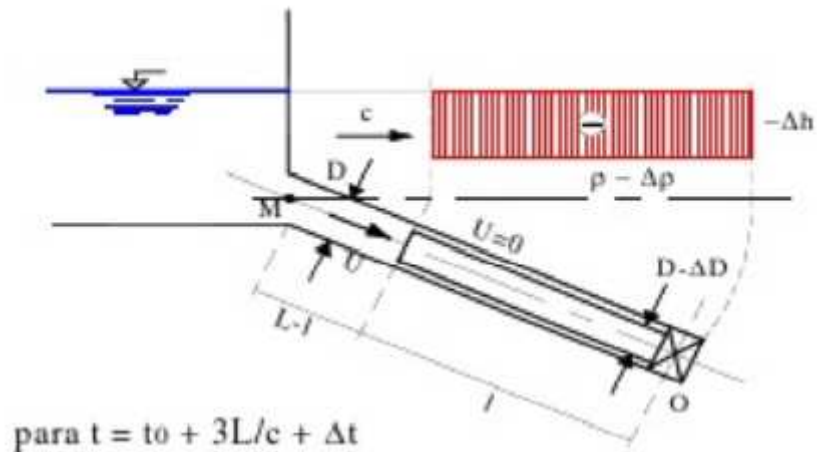


Figura 2.16. Descripción del golpe de ariete
[Fuente: Pérez y Guitelmán (2005)]

La onda de propagación y el sentido del fluido son los mismos.

Conforme el agua va avanzando se vuelven a recuperar las condiciones iniciales y el diámetro D se restablece ($4t_0 = \frac{4L}{c}$)

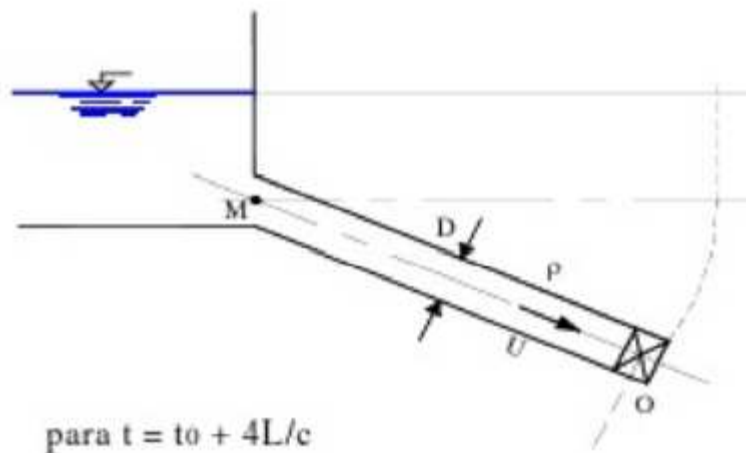


Figura 2.17. Descripción del golpe de ariete
[Fuente: Pérez y Guitelmán (2005)]

Aquí termina el primer ciclo del proceso y si la válvula O permanece cerrada, se volverá a repetir otro segundo ciclo de manera semejante, pero de menor intensidad, debido a las pérdidas que existen dentro de la tubería, tendiendo a una situación final de equilibrio en la que la velocidad es nula en toda la conducción y la presión coincide con la estática. (Arviza Valverde *et al.* 2002).



Figura 2.18. Evolución de la presión durante el transitorio en el punto O. (Aguas arriba de la válvula de cierre)

[Fuente: Arviza Valverde *et al.* (2002)]

En la figura anterior se muestra la variación de la presión aguas arriba de la válvula desde el inicio del transitorio. Pudiéndose observar que se trata de un fenómeno oscilatorio igual a dos veces el pulso de Allievi y con un periodo igual a $4 \frac{L}{c}$.

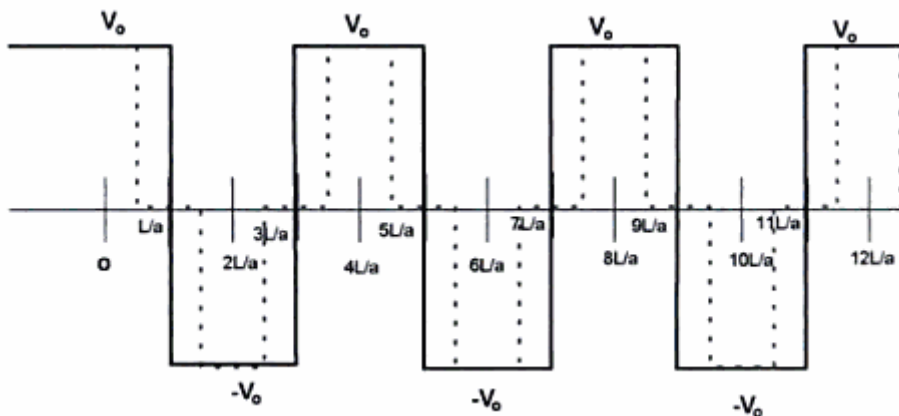


Figura 2.19. Evolución de la velocidad con el tiempo, en el transitorio. (Línea continua: a la salida del depósito. Línea a trazos: en el punto medio de la conducción)

[Fuente: Arviza Valverde *et al.* (2002)]

2.6.4 Tiempo de cierre de una válvula

El cálculo de sobrepresiones depende del tiempo de cierre de una válvula y tanto la teoría como la práctica demuestran que las máximas sobrepresiones posibles se logran para los casos en los que la maniobra de cierre sea menor que el tiempo que tarda la onda en su viaje de ida y vuelta al obturador. Este tiempo lo denominaremos tiempo crítico t_c (Pérez y Guitelmán, 2005) y equivale a: $t_c = 2t_0 = 2 \frac{L}{c}$

Así, teniendo en cuenta el tiempo crítico de cierre, podemos considerar los

tiempos de cierre de la válvula:

- Cierre rápido: el tiempo de cierre de la válvula es menor que el tiempo crítico ($t < t_c$). En el cierre rápido de una válvula la onda de presión no tiene tiempo de ir al estanque, reflejarse y volver a dicha válvula antes de que termine medio ciclo.

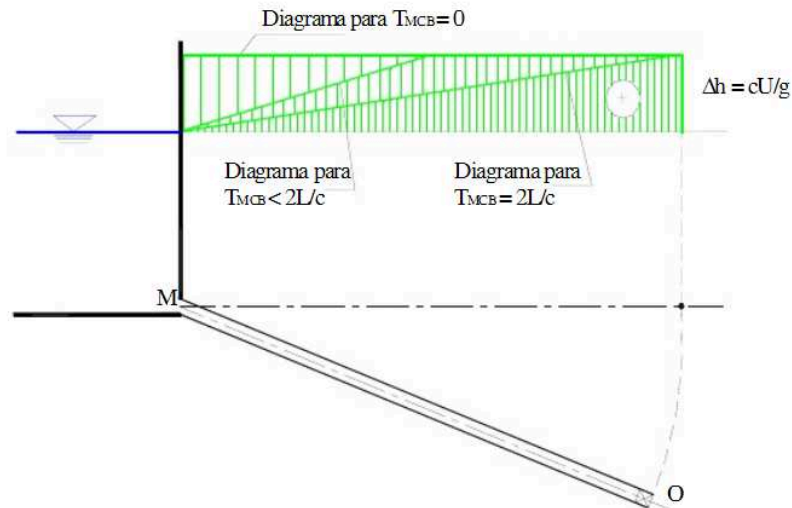


Figura 2.20. Cierre rápido. Diagrama para los distintos valores que puede tomar t_c
[Fuente: Pérez y Guitelmán (2005)]

- Cierre lento: el tiempo de cierre de la válvula es mayor que el tiempo crítico ($t > t_c$) por lo que la presión máxima será menor que en los casos anteriores debido a que la depresión de la onda elástica llega a la válvula antes de que se complete el medio ciclo e impide el aumento de presión (Afif Khouri, 2004).

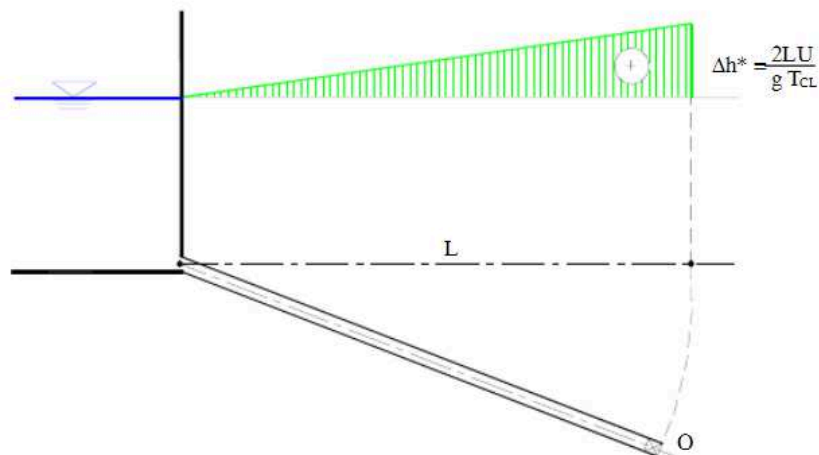


Figura 2.21. Cierre lento de una válvula
[Fuente: Pérez, L.E. y Guitelmán, A. (2005)]

2.6.5 Mecanismos para la prevención o mitigación del golpe de ariete

Instalar válvulas apropiadas en las líneas de conducción y controlar su tiempo de cierre.

Cierre lento de las válvulas.

Escoger un diámetro de las tuberías un poco más grande para que la velocidad del fluido sea menor.

En el caso de sistemas bombeados, utilizar una bomba con volante para que en el caso de corte de corriente se reduzca lentamente la velocidad del motor y por consiguiente la velocidad del agua en la tubería.

Usar una cámara o colchón de aire.

Instalar válvulas de seguridad.

2.6.6 El golpe de ariete aplicado a la Ingeniería

Bajo el punto de vista de la Ingeniería no se puede observar este fenómeno como perjudicial en todos los casos, ya que, por ejemplo, en el caso del ariete hidráulico, el golpe de ariete va a ser el principio básico para el funcionamiento de la bomba, creando una sobrepresión que luego va a ser utilizada para impulsar el fluido a un punto más alto.

Es por ello que para el diseño de la bomba de ariete interesa que la válvula de impulso se cierre de la forma más rápida posible para crear una mayor sobrepresión.

2.6.7 Cálculo del golpe de ariete para el cierre brusco de una válvula

Como hemos explicado anteriormente, desde el punto de vista del diseño del ariete hidráulico, nos interesa que el cierre de la válvula se produzca lo más rápido posible, por lo que vamos a proceder a explicar cómo se realiza el cálculo para conocer cuál es la máxima sobrepresión alcanzada en el interior del cuerpo de la bomba.

Para ello, debemos conocer en primer lugar el tiempo crítico de cierre y comprobar que el tiempo de cierre de la válvula es menor que el primero ($t < t_c$).

$$t_c = \frac{2L}{c}$$

Siendo:

L: longitud de la tubería.

c: celeridad de la onda, que a su vez se calcula:

$$c = \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}}}{\sqrt{1 - \frac{\varepsilon D}{eE}}}$$

Siendo:

ε : módulo de compresibilidad del fluido.

ρ : densidad del fluido.

E: módulo de elasticidad del material de la tubería.

e: espesor de la tubería.

D: diámetro de la tubería.

Una vez obtenida la celeridad y el tiempo crítico de cierre y habiéndose comprobado que se trata de un cierre rápido de la válvula, se puede obtener la máxima sobrepresión posible obtenida a raíz del golpe de ariete, utilizando la fórmula de Allievi:

$$\Delta h_{max} = \frac{c U}{g}$$

Siendo:

c: celeridad de la onda.

U: velocidad media en el régimen uniforme.

g: aceleración normal de la gravedad.

2.7 Ciclo teórico del ariete hidráulico

El funcionamiento del ariete hidráulico no está completamente dilucidado, en especial lo concerniente a su diseño hidráulico, debido a la rapidez, simultaneidad y complejidad de los fenómenos involucrados. Por ello, la asunción de un modelo exclusivamente teórico es imprecisa: las variables del proceso desbordan las exigencias de las fórmulas matemáticas si no se recurre a la experimentación (Campaña Calero y Guamán Alarcón, 2011).

Los estudios que se han realizado alrededor del ariete pueden ser divididos en tres principales grupos:

Métodos empíricos: se basa en pruebas experimentales con resultados no apoyados o correlacionados por la teoría. Las fórmulas empíricas no son suficientes para la predicción de la operación del ariete ya que el proceso hidráulico depende de varias variables, las cuales son obviadas en el estudio.

Métodos analíticos: usando las reglas básicas de la hidráulica y de la mecánica de fluidos se ha intentado acertar la tasa de cambio de la variable velocidad del agua en la tubería de impulso para cada periodo del ciclo. Estos métodos no fueron muy satisfactorios puesto que parámetros relacionados con la operación del hydram son obtenidos mejor por el método empírico.

Métodos racionales: basados en análisis teóricos de la bomba de ariete con otros determinados experimentalmente. Constituye el modelo más exitoso para el estudio del ariete hidráulico.

A pesar de la cantidad de variables y procesos simultáneos involucrados, Krol hizo una interpretación correcta de los fenómenos que ocurren en el funcionamiento de la bomba de ariete, creando un modelo matemático que junta los resultados experimentales con los teóricos. (Campaña Calero y Guamán Alarcón, 2011)

Por ello, en el presente proyecto nos vamos a centrar en su modelo para describir el ciclo y el funcionamiento del ariete hidráulico.

2.7.1 Modelo de Krol

Krol publica, en 1951, "*The automatic hydraulic ram. Its Theory and Design*" donde, sirviéndose de las ecuaciones del modelo de Schiller, realiza un estudio teórico experimental.

La finalidad que posee su trabajo es la de proveer de un modelo matemático capaz de solventar las variables del hydram, describiendo, para ello, cada uno de los siete periodos en los cuales divide el proceso de funcionamiento de la bomba de ariete.

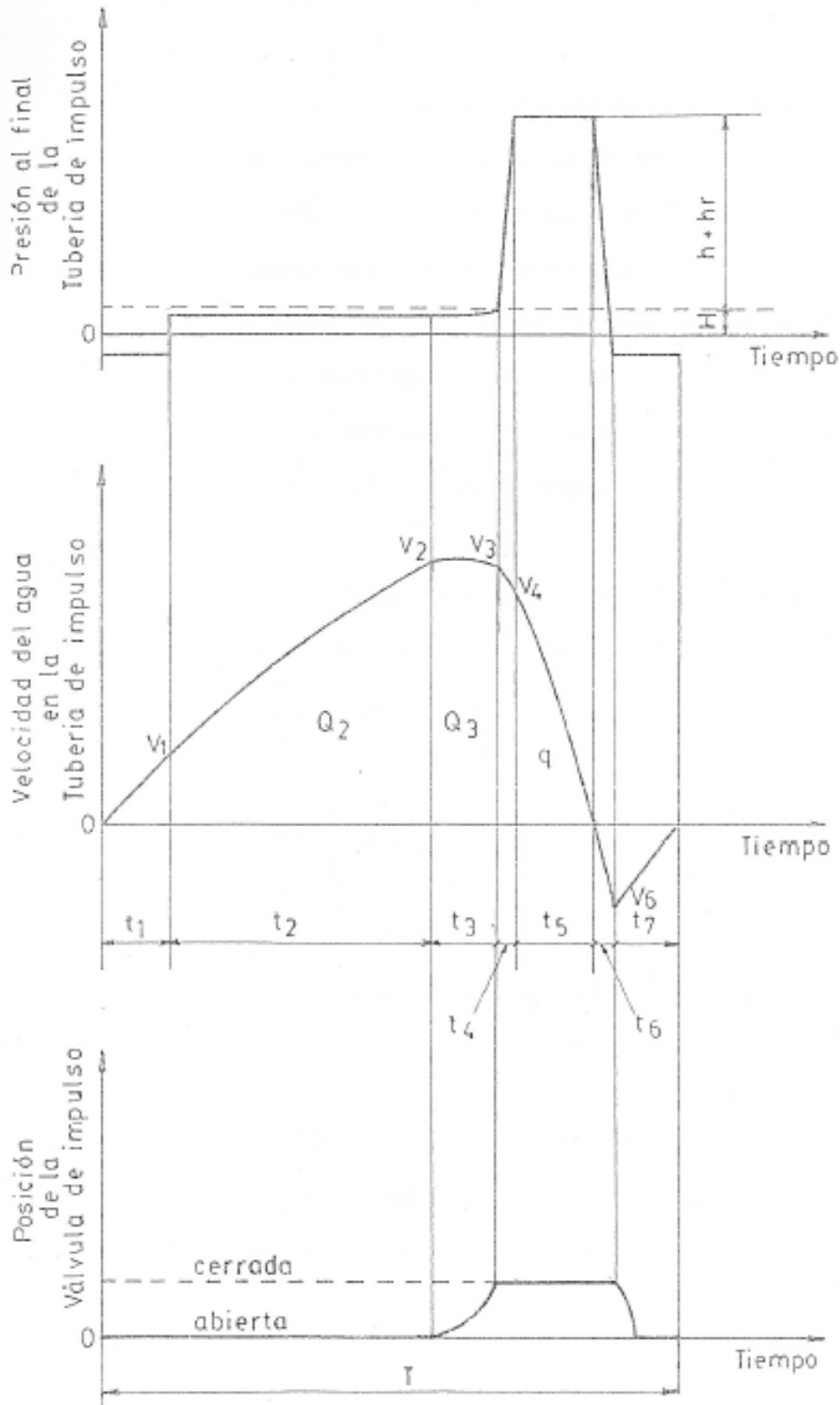


Figura 2.22. Ciclo teórico del ariete hidráulico según el Modelo de Krol [Fuente: Krol (1951)]

Periodo 1

Este periodo, junto con el segundo, es también conocido como fase de aceleración debido a que el líquido fluye por la tubería de alimentación adquiriendo una velocidad que va ascendiendo en función del tiempo como consecuencia de la presión provocada por la altura del nivel del fluido en el depósito de suministro, río o acequia.

El presente periodo se inicia en un momento en el que, por efectos de la fase anterior (periodo 7), el agua ha retornado una distancia y desde el extremo de la tubería de alimentación, finalizando una vez que el agua toma contacto con la válvula de impulso.

Por otro lado, la válvula de entrega se mantiene cerrada gracias a la carga de servicio que actúa sobre ella.

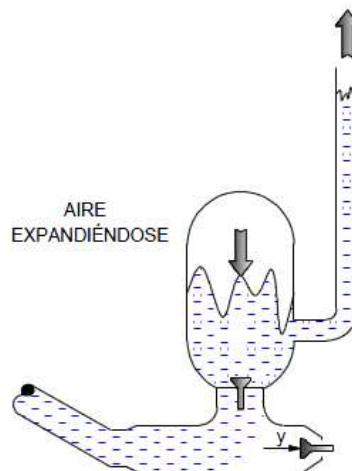


Figura 2.23. Periodo 1 del ciclo del ariete hidráulico
[Fuente: Campaña Calero y Guamán Alarcón (2011)]

Para describir el proceso de funcionamiento del ariete hidráulico, y considerando, para esta primera fase, el fluido como incompresible, se parte de la ecuación del momento de un volumen control:

$$\frac{d}{dt} \int \rho v dv_c + F_{p1} - F_{p2} + M_1 - M_2 - \Delta H = 0$$

Siendo:

ρ = densidad del fluido.

v = velocidad del fluido.

F_{p1} = Fuerza de presión en el punto 1.

F_{p2} = Fuerza de presión en el punto 2.

M_1 = Cantidad de movimiento por unidad de tiempo en el punto 1.

M_2 = Cantidad de movimiento por unidad de tiempo en el punto 2.

ΔH = pérdida de carga del líquido.

A su vez, acudiendo a la ecuación de continuidad y teniendo en cuenta que la sección de la tubería es constante, se puede afirmar:

$$v_1 = v_2 = v$$

$$M_1 = M_2$$

Teniendo en cuenta esta situación, la ecuación del momento quedará de la siguiente forma:

$$\frac{d}{dt} \int \rho v dv_c + F_{p1} - F_{p2} - \Delta H = 0$$

Paralelamente, se puede obtener el valor de la presión en el punto 1:

$$p_1 = \gamma \left(H - \frac{v^2}{2g} \right)$$

Siendo:

γ = peso específico del fluido.

H = altura del nivel del agua en el depósito de suministro.

g = aceleración gravitatoria.

Para posteriormente poder calcular la fuerza ejercida por la presión dicho punto:

$$F_{p1} = p_1 A = \gamma A \left(H - \frac{v^2}{2g} \right)$$

Siendo:

A : área de la sección de la tubería.

La pérdida de carga, ΔH , es la energía dinámica del fluido perdida debido a la fricción de las partículas del fluido entre sí y contra las paredes de la tubería que las contiene.

$$\Delta H = \gamma A (\Delta H_T + \Delta H_A)$$

Siendo:

ΔH_T : pérdida de carga asociada a la fricción de las partículas del fluido entre sí y contra las paredes de la pared de la tubería.

ΔH_A : pérdida de carga asociada a la fricción de las partículas del líquido con los accesorios que puedan existir en el tramo.

Mediante la fórmula de Darcy-Weisbach se puede calcular la pérdida de carga asociada a la fricción de las partículas del fluido entre sí y contra las paredes de la pared de la tubería.

$$\Delta H_T = f \frac{L v^2}{D 2g}$$

Siendo:

f: factor de fricción.

L: longitud de la tubería.

D: diámetro de la tubería.

El factor de fricción, f , es un valor adimensional que se puede calcular mediante el diagrama de Moody en el cual se relacionan distintos valores del factor de fricción con otros del número de Reynolds y de la rugosidad relativa.

$$f \left(Re, \frac{\varepsilon}{D} \right)$$

Siendo:

Re: número de Reynolds.

ε/D : rugosidad relativa.

El número de Reynolds es, también, un valor adimensional mediante el cual se relacionan distintos parámetros que afectan al fluido y en el que se pone en evidencia la relación de las partículas del fluido entre sí y del mismo fluido con la tubería que lo alberga.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

Siendo:

ρ : densidad del fluido.

v: velocidad del fluido en la tubería.

μ : viscosidad dinámica del fluido.

Es por ello, que podemos afirmar que las pérdidas de carga asociadas a la ecuación de Darcy-Weisbach, interviene no sólo la pérdida de altura como consecuencia de la fricción provocada entre el líquido y la pared de la tubería,

sino también la pérdida de carga ocasionada entre las propias partículas del fluido al circular por dicha tubería.

Mientras, también se deben calcular las pérdidas de carga provocadas por la fricción del fluido con los accesorios de la instalación.

$$\Delta H_A = \sum k \frac{v^2}{2g}$$

A diferencia con el factor de fricción f , k es un valor obtenido experimentalmente, por lo que se le aplicará un determinado valor según sea el accesorio que esté instalado por el que pase el líquido.

Por tanto, agrupando las anteriores ecuaciones, podemos decir que la pérdida de carga total en la tubería será:

$$\Delta H = \gamma A \left[\left(f \frac{L v^2}{D 2g} \right) + \left(\sum k \frac{v^2}{2g} \right) \right] = \gamma A \left(f \frac{L v^2}{D 2g} \right) + \gamma A \left(\sum k \frac{v^2}{2g} \right)$$

Por otro lado, la aceleración del agua por la tubería de impulso está dada por la Segunda Ley de Newton:

$$\sum F = m a$$

$$F_{p1} - \Delta H = m a$$

$$\gamma A \left(H - \frac{v^2}{2g} \right) - \gamma A \left[\left(f \frac{L v^2}{D 2g} \right) + \left(\sum k \frac{v^2}{2g} \right) \right] = \frac{\gamma A L}{g} \frac{dv}{dt}$$

$$\gamma A \left[H - \frac{v^2}{2g} \left(1 + f \frac{L}{D} + \sum k \right) \right] = \frac{\gamma A L}{g} \frac{dv}{dt}$$

$$H - \frac{v^2}{2g} \left(1 + f \frac{L}{D} + \sum k \right) = \frac{L}{g} \frac{dv}{dt}$$

Debido a que las pérdidas de carga, para este periodo son insignificantes, se puede obviar el segundo término de la ecuación, quedando:

$$H = \frac{L}{g} \frac{dv}{dt}$$

Obteniendo, finalmente, como solución:

$$t_1 = \sqrt{\frac{2Ly}{gH}}$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2gHy}{L}}$$

Siendo:

t_1 = tiempo de duración del periodo 1.

v_1 = velocidad durante el periodo 1.

y = distancia debido al retroceso del agua.

H = altura del nivel del agua en el depósito de suministro.

Periodo 2

El fluido escapa por la válvula de impulso alcanzando una velocidad máxima, v_2 , necesaria para adquirir una energía cinética suficiente para contrarrestar el peso de la válvula de impulso e iniciar su cierre.

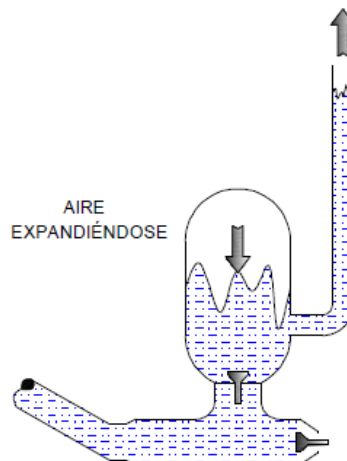


Figura 2.24. Periodo 2 del ciclo del ariete hidráulico
[Fuente: Campaña Calero y Guamán Alarcón (2011)]

Esta velocidad viene dada por la siguiente ecuación:

$$v_2 = \sqrt{\frac{Wg}{A'\gamma K_0}}$$

Siendo:

W : masa de la válvula de impulso.

A' : área de la válvula de impulso.

K_0 : coeficiente de resistencia al cierre de la válvula de impulso.

La velocidad en la tubería para que ocurra el cierre de la válvula de impulso, será:

$$v_2 = (0.3 \text{ a } 0.5) \sqrt{\frac{2gH}{Z}}$$

Siendo:

Z: coeficiente total de pérdidas.

Dicho coeficiente será el conjunto de todas las pérdidas de carga que existen en la tubería como consecuencia de la fricción del líquido con la pared, con los accesorios que forman parte de la instalación, o de partículas del propio fluido entre sí, y que en el periodo anterior hemos obviado al considerarlas de poca magnitud.

$$Z = 1 + f \frac{L}{D} + \sum k$$

El periodo 2 constituye casi la mayor parte, en tiempo, del ciclo del ariete hidráulico por lo que en este caso sí se han de tener en cuenta las pérdidas de carga:

$$\sum F = m a$$

$$F_{p1} - F_f = m a$$

$$\gamma A \left(H - \frac{v^2}{2g} \right) - \gamma A \left[\left(f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \right) + \left(\sum k \frac{v^2}{2g} \right) \right] = \frac{\gamma A L}{g} \frac{dv}{dt}$$

$$\gamma A \left[H - \frac{v^2}{2g} \left(1 + f \frac{L}{D} + \sum k \right) \right] = \frac{\gamma A L}{g} \frac{dv}{dt}$$

$$H - \frac{v^2}{2g} \left(1 + f \frac{L}{D} + \sum k \right) = \frac{L}{g} \frac{dv}{dt}$$

Como Z es el coeficiente total de pérdidas:

$$Z = 1 + f \frac{L}{D} + \sum k$$

Sustituyendo dicho valor, obtenemos la siguiente expresión:

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

Al multiplicar dicha ecuación por $\frac{2g}{Z}$ y despejando dt , obtendremos:

$$dt = \frac{\frac{2L}{Z}}{\frac{2gH}{Z} - v^2} dv$$

$$\int dt = \int_{v_1}^{v_2} \frac{\frac{2L}{Z}}{\frac{2gH}{Z} - v^2} dv$$

$$t_2 = \frac{L}{\sqrt{2gZH}} \ln \frac{\left[1 + \sqrt{\frac{WZ}{2HA'\gamma K_0}}\right] \left[1 - \sqrt{\frac{yZ}{L}}\right]}{\left[1 - \sqrt{\frac{WZ}{2HA'\gamma K_0}}\right] \left[1 - \sqrt{\frac{yZ}{L}}\right]}$$

Siendo:

t_2 : tiempo de duración del periodo 2.

La cantidad de agua desechada por la válvula de impulso durante este tiempo está dada por:

$$Q_2 = \gamma A \int_{v_1}^{v_2} v dt$$

Siendo:

A: área de la tubería de alimentación.

Al remplazar dt , queda:

$$Q_2 = \gamma A \int_{v_1}^{v_2} v \frac{\frac{2L}{Z}}{\frac{2gH}{Z} - v^2} dv$$

$$Q_2 = \frac{\gamma AL}{Z} \ln \left[\frac{\frac{2gH}{Z} - \frac{2gHy}{L}}{\frac{2gH}{Z} - \frac{Wg}{A'\gamma K_0}} \right]$$

Pero, si:

$$\frac{2gH}{Z} - \frac{Wg}{A'\gamma K_0} = 0$$

$$Q_2 = \infty$$

De aquí podemos sacar una conclusión importante y es que si el caudal desperdiciado tiende a infinito, la válvula de impulso no se cerrará en ningún momento, por lo que la masa de la válvula de impulso debe satisfacer la siguiente condición:

$$0 < W < \frac{2HA'\gamma K_0}{Z}$$

Volviendo a la ecuación siguiente e integrando podremos calcular el tiempo de duración conjunto del periodo 1 y el periodo 2.

$$dt = \frac{\frac{2L}{Z}}{\frac{2gH}{Z} - v^2} dv$$

$$\int_0^{t_1+t_2} dt = \int_0^{v_2} \frac{\frac{2L}{Z}}{\frac{2gH}{Z} - v^2} dv$$

$$t_1 + t_2 = \frac{L}{\sqrt{2gZH}} \ln \left[\frac{1 + \sqrt{\frac{WZA'H\gamma K_0}{2}}}{1 - \sqrt{\frac{WZA'H\gamma K_0}{2}}} \right]$$

Periodo 3

La velocidad del fluido es ahora tal que la fuerza provocada en el interior de la válvula de impulso supera el peso de la misma.

La válvula de impulso comienza a cerrarse, completando su clausura al final del periodo 3.

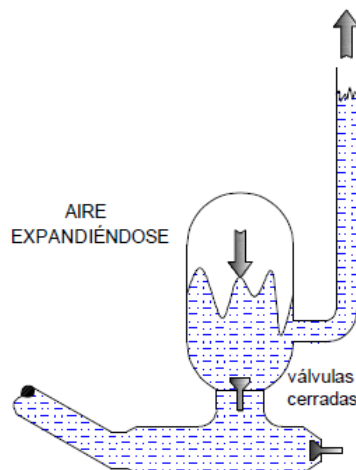


Figura 2.25. Periodo 3 del ciclo del ariete hidráulico
[Fuente: Campaña Calero y Guamán Alarcón (2011)]

El análisis matemático del periodo 3 es complicado debido a que tanto el fluido como la válvula de impulso están en movimiento.

Por ello, Krol, se basa en la segunda Ley de Newton, aunque introduciendo

algunas simplificaciones matemáticas:

$$\frac{d^2s}{dt} = \frac{\frac{2Hg^2t}{L} \left[1 - \frac{WZ}{2A'\gamma HK_0} \right]}{\sqrt{\frac{Wg}{A'\gamma K_0}}}$$

Quedando:

$$t_3 = \sqrt[3]{\frac{LS \sqrt{\frac{Wg}{A'\gamma K_0}}}{4g^2H \left(1 - \frac{WZ}{2A'\gamma HK_0} \right)}}$$

Siendo:

t_3 : tiempo de duración del periodo 3.

S: carrera de la válvula de impulso.

Debido a que el periodo 3 tiene una duración muy pequeña, la velocidad casi no varía su velocidad inicial, por lo que podemos asumir:

$$v_2 = v_3$$

Por lo que la cantidad de agua desechada, en este periodo, teniendo en cuenta la anterior consideración, la podemos estimar de la siguiente forma:

$$Q_3 = \gamma A v_3 t_3 = \gamma A v_2 t_3$$

Siendo:

Q_3 : cantidad de agua desechada a través de la válvula de impulso.

La energía cinética, al final del periodo 3, de la columna de agua se podrá determinar:

$$E_c = \frac{m v_3}{2}$$

Si:

$$v_2 = v_3$$

$$m = \frac{\gamma AL}{g}$$

Se tiene, sustituyendo:

$$E_c = \frac{\gamma AL}{2g} v_3 = \frac{\gamma AL}{2g} v_2$$

Siendo:

E_c : energía cinética de la columna de agua.

m : masa de la columna de agua.

Periodo 4

Cuando acaba el periodo 3, la válvula de impulso se encuentra completamente cerrada, causando una sobrepresión, fenómeno conocido como golpe de ariete.

Considerando la inercia de las válvulas, se toma un tiempo $\frac{2L}{c}$ hasta que el momento dinámico creado por el golpe de ariete se traslada desde la válvula de impulso hasta la válvula de descarga, provocando la apertura de ésta última.

Al mismo tiempo, la velocidad en la tubería es reducida en proporción a la cabeza de presión ($h + h'$).

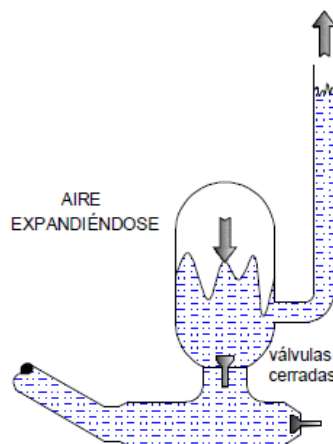


Figura 2.26. Periodo 4 del ciclo del ariete hidráulico
[Fuente: Campaña Calero y Guamán Alarcón (2011)]

La duración del periodo 4 es muy corta por lo que se puede asumir:

$$t_4 = \frac{2L}{c}$$

Siendo:

t_4 : tiempo de duración del periodo 4.

c : celeridad de la onda.

Pudiéndose decir que t_4 es el tiempo requerido para una completa reflexión de una onda de presión que viaja a lo largo de la tubería de impulso (tiempo crítico).

La celeridad, se puede calcular como:

$$c = \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}}}{\sqrt{1 - \frac{\varepsilon D}{eE}}}$$

Siendo:

ε : módulo de compresibilidad del fluido.

ρ : densidad del fluido.

E : módulo de elasticidad del material de la tubería.

e : espesor de la tubería.

D : diámetro de la tubería.

Podremos calcular la velocidad de este periodo a raíz de la siguiente relación:

$$v_4 = v_3 - (h + h_r) \frac{g}{c}$$

Siendo:

v_4 : velocidad al final del periodo 4.

h : altura de descarga medida desde el nivel de suministro.

h_r : pérdida de carga durante el periodo de retardación.

La pérdida de carga, durante el periodo de retardación en la tubería de impulso, en la válvula de descarga y en la tubería de descarga, se puede expresar de la siguiente forma:

$$h_r = 5.64 \left(1 - \frac{h}{h_{max}} \right)$$

Siendo:

h_{max} : altura de descarga máxima desarrollada por el ariete.

Volviendo a la fórmula para el cálculo de la velocidad en el periodo 4, la altura máxima de descarga que desarrolla el ariete la podremos calcular cuando:

$$v_4 = 0 \text{ y } h_r = 0$$

$$v_4 = v_3 - (h + h_r) \frac{g}{c}$$

De tal modo:

$$h_{max} = \frac{c v_3}{g}$$

Si $v_2 = v_3$, se tiene:

$$h_{max} = \frac{c}{g} \sqrt{\frac{Wg}{A'\gamma K_0}}$$

Esta ecuación muestra que para un peso dado de la válvula de descarga W y una longitud S , hay siempre una altura máxima de descarga a la cual puede ser bombeada el agua y también muestra que si la válvula de impulso es demasiado liviana, únicamente se puede obtener una pequeña altura de descarga.

Debido a la reducción de la velocidad en este periodo por efecto de la subida de presión (golpe de ariete), hay una cierta pérdida de energía cinética que es gastada en la compresión del agua contenida en la tubería de impulso y el ensanchamiento de las paredes de la misma.

Esta pérdida de la energía cinética puede determinarse como:

$$E_{cp} = \frac{m \Delta v^2}{2}$$

Siendo:

E_{cp} : energía cinética perdida.

Δv^2 : incremento de la velocidad.

Si:

$$\Delta v^2 = \frac{(h + h_r)^2 g^2}{c^2}$$

$$m = \frac{\gamma AL}{g}$$

Se tiene, por tanto:

$$E_{cp} = \frac{\gamma AL (h + h_r)^2 g}{2c^2}$$

Periodo 5

Este periodo corresponde al bombeo, encontrándose, para ello, la válvula de descarga completamente abierta.

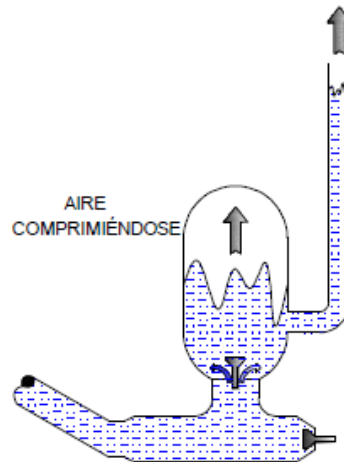


Figura 2.27. Periodo 5 del ciclo del ariete hidráulico
[Fuente: Campaña Calero y Guamán Alarcón (2011)]

La energía cinética proveniente de la columna de agua en movimiento es transformada en energía hidráulica, por lo que la masa de agua que cumple con las condiciones de presión es bombeada, más el aire comprimido que ha estado retenido desde el inicio del ciclo bajo la válvula de descarga.

Por tanto, la cantidad de agua bombeada por ciclo resulta de la aplicación de la Ley de Conservación de la Energía. La energía útil para bombear agua a una altura $(h + h_r)$, será igual a la energía cinética que poseía la columna de agua, al final del periodo anterior, menos la energía cinética gastada en la compresión del fluido y en la dilatación de las paredes de la tubería.

$$E_{disp} = E_h$$

Siendo:

E_{disp} : energía disponible.

E_h : energía hidráulica.

$$E_{disp} = E_c - E_{cp}$$

$$E_h = q'(h + h_r)$$

Igualando, acorde a lo explicado anteriormente:

$$q'(h + h_r) = E_c - E_{cp}$$

$$q' = \frac{E_c - E_{cp}}{h + h_r}$$

Mientras, la duración del periodo 5 se puede determinar por el teorema de Impulso y cantidad de movimiento:

$$\text{Impulso} = \int F dt = \int_0^{t_5} \gamma(h + h_r) \frac{\pi D^2}{4} = \gamma(h + h_r) \frac{\pi D^2}{4} t_5$$

$$\text{Cantidad de movimiento} = \frac{\gamma AL}{g} (v_4 - v_5)$$

Siendo:

v_5 : velocidad durante el periodo 5.

t_5 : tiempo de duración del periodo 5.

Igualando las dos ecuaciones:

$$F dt = m dv$$

$$\gamma(h + h_r) \frac{\pi D^2}{4} t_5 = \frac{\gamma AL}{g} (v_4 - v_5)$$

Si:

$$v_4 = v_3 - (h + h_r) \frac{g}{c}$$

$$v_2 = v_3$$

Se tiene:

$$t_5 = \frac{L}{g(h + h_r)} \left[\sqrt{\frac{Wg}{\gamma A' K_0}} - \frac{(h + h_r)g}{c} \right]$$

Esta ecuación obtenida pone en evidencia que el tiempo de descarga decrece rápidamente con el incremento de la altura de descarga.

Una vez abierta la válvula de descarga comienza a liberarse la sobrepresión, debido a que la fuerza retardadora de la carga es mayor que la carga de abastecimiento.

Cuando la velocidad de flujo se anula, se termina la etapa de bombeo; sin embargo el fluido que se encuentra en la cámara de aire tiende a regresar al cuerpo del ariete, como consecuencia de que la cámara de aire dispone de mayor presión, en dicho momento, que el cuerpo; por lo que es menester un cierre correcto en el instante preciso de la válvula de descarga, ya que

aprovisionará al hydram de un mayor rendimiento.

Periodo 6

Este periodo comprende el intervalo de tiempo desde que se cierra la válvula de descarga hasta el inicio de la apertura de la válvula de impulso por inercia de las dos válvulas.

Además, en el instante de cierre de la válvula de descarga, el valor de la presión de la cámara de aire será un poco mayor que la del cuerpo del ariete. Esta situación provoca un flujo de retorno desde la válvula hacia el depósito, alcanzando, de este modo, una presión menor que la atmosférica en el cuerpo del ariete.

Este breve intervalo de “vacío” es aprovechado por una válvula, situada bajo la válvula de descarga, para inyectar cierta cantidad de aire con la finalidad de reponer el aire que se halla podido disolver en el agua en la operación de bombeo.

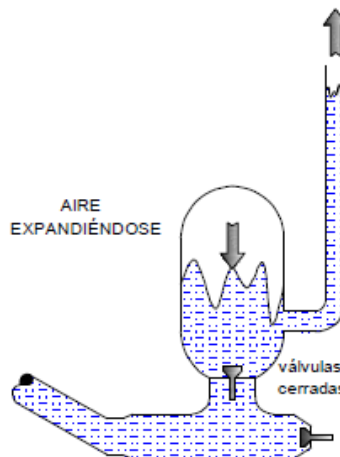


Figura 2.28. Periodo 6 del ciclo del ariete hidráulico
[Fuente: Campaña Calero y Guamán Alarcón (2011)]

La energía elástica que acumuló el agua en la tubería de impulsión se convierte en energía cinética. Como el agua rebota desde la válvula de descarga hacia el depósito, la velocidad será negativa.

Dicha velocidad negativa se obtiene igualando la energía de deformación del agua y la energía cinética que produce v_6 en la tubería de impulsión.

$$\frac{A\gamma Lg(h + h_r)}{2c^2} = \frac{\gamma AL}{2g} v_6$$

$$v_6 = -\frac{(h + h_r)g}{c}$$

Siendo:

v_6 : velocidad durante el periodo 6.

El tiempo de duración de este periodo es muy corto y se puede considerar como el requerido para una reflexión completa de una onda de presión:

$$t_6 = \frac{2L}{c}$$

Siendo:

t_6 : tiempo de duración del periodo 6.

Periodo 7

Al final del periodo 6, el fluido, en la tubería de impulso, adquiere un valor negativo, por lo que la válvula de impulso se abre como consecuencia de su propio peso y se origina una diferencia de presión causada por el retroceso del agua.

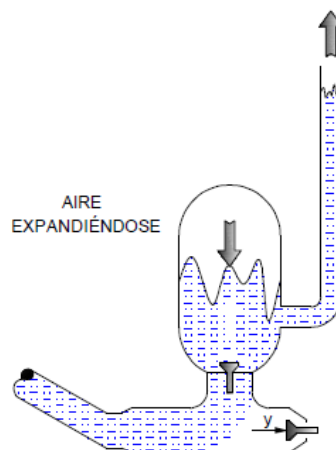


Figura 2.29. Periodo 7 del ciclo del ariete hidráulico
[Fuente: Campaña Calero y Guamán Alarcón (2011)]

El tiempo de duración de este periodo se puede estimar acorde lo visto en el periodo 1:

$$H = \frac{L}{g} \frac{dv}{dt}$$

$$t_7 = \frac{L}{gH} v_7$$

Siendo:

t_7 : tiempo de duración del periodo 7.

v_7 : velocidad durante el periodo 7.

Remplazando el valor de v_6 se obtiene:

$$t_7 = \frac{L(h + h_r)}{Hc}$$

La magnitud de la distancia y que viaja el retroceso del agua dentro de la tubería de impulso, también puede ser calculada según las ecuaciones descritas en el periodo 1:

$$v_1 = v_7$$

$$\sqrt{\frac{2gHy}{L}} = \frac{(h + h_r)g}{c}$$

$$y = \frac{(h + h_r)^2 Lg}{2Hc^2}$$

Siendo:

y = distancia debido al retroceso del agua.

2.8 Detalles en el diseño de una instalación con bomba de ariete

El ariete hidráulico, como bien se ha explicado anteriormente, es una bomba que aprovecha la energía potencial del líquido para generar una sobrepresión, mediante el cierre de la válvula de impulso, que va a permitir elevar parte de dicho fluido a un punto superior. Por ello, a la hora de llevar a cabo un proyecto de bombeo de agua, sea para el riego de una finca agrícola o bien para el suministro de agua a granjas o a casas, se tienen que tener en cuenta una serie de consideraciones que se deben estudiar atentamente con el fin de observar si es viable dicho sistema de bombeo o debemos recurrir a otras opciones.

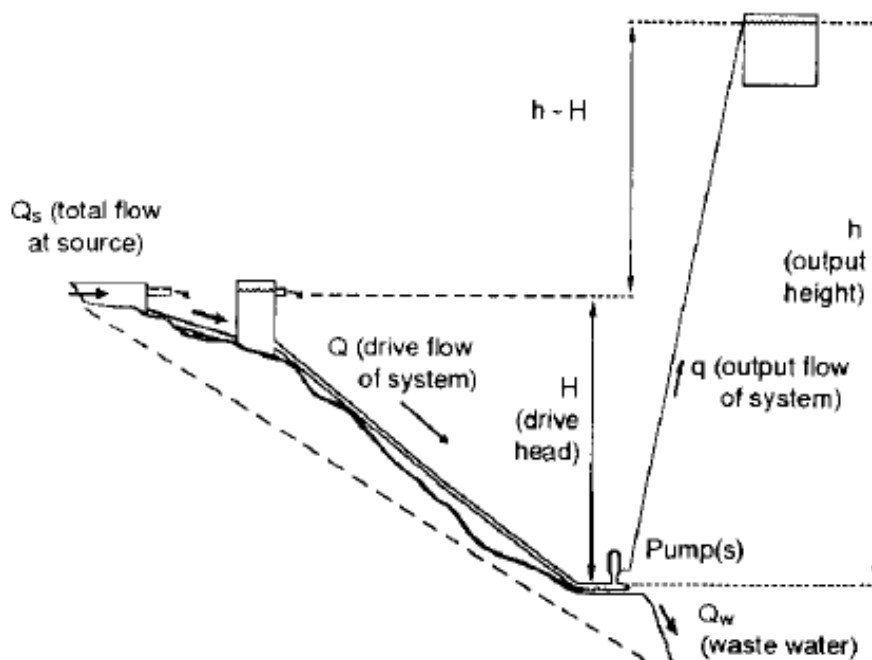


Figura 2.30. Esquema de una instalación con bomba de ariete
[Fuente: Jeffery *et al.* (1992)]

2.8.1 La elección del lugar

La elección del lugar donde se procede a instalar la bomba de ariete es el aspecto más importante para la puesta a punto y operación del hydram (Chi, 2002), y el que, a su vez, puede favorecer el fracaso del proyecto si no se ha realizado correctamente.

La realización del estudio para conocer el lugar de suministro de agua se debe efectuar en dos fases: una preliminar para valorar el potencial local, observando si verdaderamente es posible la instalación de este sistema de bombeo, seleccionando, a su vez, las distintas opciones con alto potencial; y otra posterior en la que se deben estudiar, en caso afirmativo, los

de suministro y la bomba de ariete.

Altura de elevación del agua, h : altura comprendida entre el ariete hidráulico y el depósito de descarga.

Caudal de la fuente de suministro, Q : determinado caudal de un curso de agua, medido en un año normal y en condiciones coincidentes con la estación seca, trasladado a través de la tubería de impulso para el funcionamiento de la bomba de ariete.

Caudal desperdiciado, Q_w : caudal derramado a través de la válvula de impulso que no es bombeado al lugar deseado.

Caudal bombeado o requerido, q : caudal bombeado desde la fuente de suministro al punto de descarga.

Respecto a la fuente de suministro de la cual se sustrae el agua que se va a utilizar, es determinante cerciorarse que el caudal bombeado va a ser acorde a las necesidades que se establecieron en un primer momento en el depósito de descarga, y que por lo tanto, el agua impulsada va a ser la correspondiente, teniendo en cuenta el caudal que se desperdicia, así como las posibles variaciones en el caudal del río a lo largo del año:

$$Q = Q_w + q$$

La cuantificación del agua impulsada depende principalmente del ratio entre alturas, es decir, la altura desde el depósito de descarga al hydram (h) entre la altura desde la fuente de suministro al mismo (H) (Chi, 2002).

Sin embargo, es muy difícil conseguir, de forma exacta, cuantificar este valor debido a que el caudal elevado depende del ratio entre alturas (h/H), de las pérdidas de carga en las distintas tuberías, del correcto ajuste del ariete hidráulico para conseguir la mayor eficiencia posible, etc. (Chi, 2002), aunque existe una fórmula, ampliamente utilizada en todos los estudios relacionados con bombas de ariete, que se aproxima bastante a la realidad:

$$q = \frac{\eta Q H}{h}$$

Siendo:

q : caudal elevado

η : eficiencia del ariete hidráulico

Q : caudal de suministro

h/H : ratio entre las distintas alturas.

La siguiente tabla, es característica siendo la proporcionada por las distintas casas comerciales para la realización del estudio de viabilidad, en la que se relacionan el caudal impulsado con el ratio de alturas, la eficiencia del ariete hidráulico y el caudal suministrado.

Working Fall (F) Meters	Vertical Height through which water is to be lifted (L) Meters											
	5.0	7.5	10.0	15.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	80.0	100.0	125.0
1.0	144	96	72	48	36	24	18					
1.5	216	144	108	72	54	36	27	22	18			
2.0	288	192	144	96	72	48	36	29	24	18		
2.5		240	180	120	90	60	45	36	30	23	18	
3.0		288	216	144	108	72	54	43	36	27	22	17
3.5		336	252	168	126	84	63	50	42	32	25	20
4.0			288	192	144	96	72	58	48	36	29	23
5.0			360	240	180	120	90	72	60	45	36	29
6.0			432	288	216	144	108	86	72	54	43	35
7.0				336	252	168	126	101	84	63	50	40
8.0				384	288	192	144	115	96	72	58	46
9.0				432	324	216	162	130	108	81	65	52
10.0					360	240	180	144	120	90	72	58
12.0					432	288	216	173	144	108	86	69
14.0					504	336	252	202	168	126	101	81
16.0						384	288	230	192	144	115	92
18.0						432	324	259	216	162	130	104
20.0						480	360	288	240	180	144	115

Efficiency 50%

Tabla 2.1. Litros de agua bombeados en 24 horas de funcionamiento para una bomba con una eficiencia del 50% y un caudal de suministro de 1 litro por minuto
[Fuente: Hazarika (2007)]

Por lo tanto, acorde a los datos facilitados en la anterior tabla tanto como a los consultados en el resto de la bibliografía, podemos afirmar que cuanto mayor sea el ratio (h/H), menor será el caudal bombeado al depósito de descarga y, por ende, menor la eficiencia.

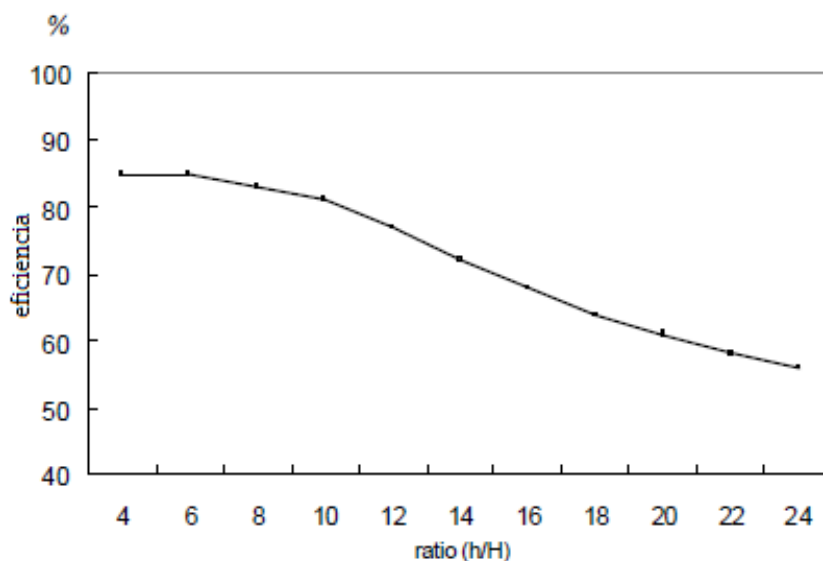


Figura 2.32. Eficiencia de un ariete hidráulico de 4" respecto al ratio de alturas
[Fuente: Chi (2002)]

Silver (1977) marca unos límites tanto máximos como mínimos para elevar el agua, admitiendo que la altura mínima para elevar una porción de fluido será dos veces la altura de caída, mientras que la altura máxima de bombeo corresponde a veinte veces la altura de impulso al hydram. Jeffery *et al.* (1992), por su parte, sitúan el ratio de alturas normalmente entre 5 y 25, sin embargo, se puede observar y algunos autores recomiendan que dicho valor no supere la relación de 8 debido a que a partir de dicho rango la eficiencia decrece rápidamente (Chi, 2002).

Otro aspecto importante, y en muchos casos definitivo, para elegir un emplazamiento, sobre todo en lugares donde el agua es un bien escaso, es el de buscar una alternativa al fluido derramado a través de la válvula de impulso durante el funcionamiento del ariete.

Es de importancia categórica este asunto debido a que el caudal derramado suele ser igual o mayor al bombeado, dependiendo del rendimiento de la bomba de ariete, por lo que la opción más adecuada y que la mayor parte de las fuentes bibliográficas consultadas proponen, es su retorno al lugar de origen aguas abajo.

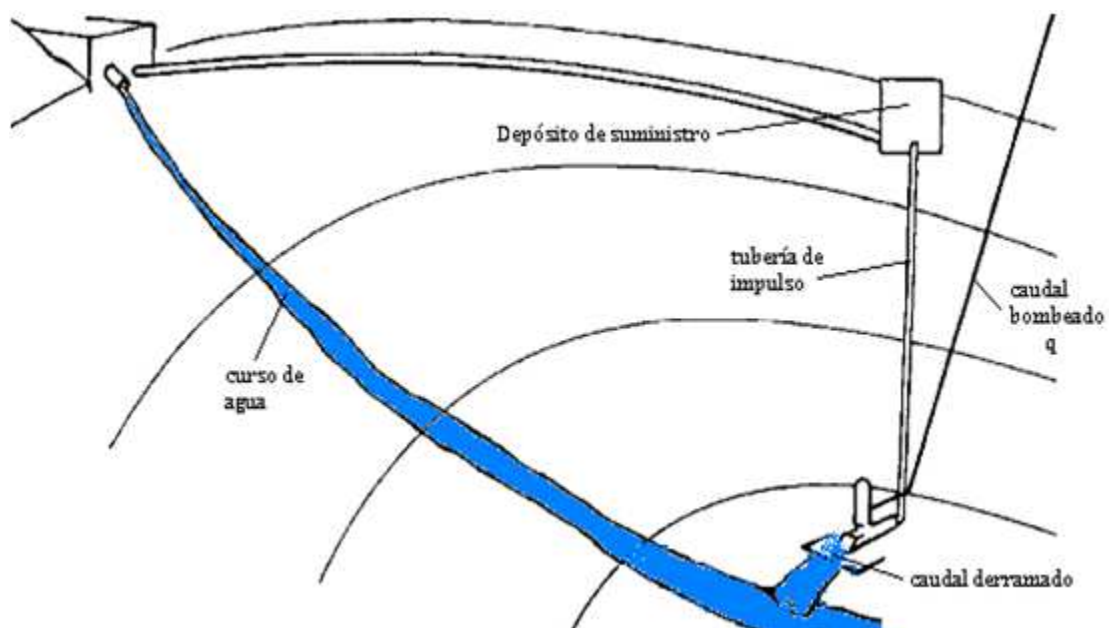


Figura 2.33. Detalle de la devolución del caudal derramado al río, aguas abajo
[Fuente: Jeffery *et al.* (1992)]

2.8.2 Elección de la bomba de ariete

Cuando se procede a la elección de la bomba de ariete, se deben haber estudiado los parámetros característicos del lugar a instalar el hydram, y, por lo tanto, conocer una estimación del caudal disponible (Q), la altura de la fuente de abastecimiento (H), la altura del depósito de descarga (h) y las necesidades

hidráulicas que se requieren.

El conocimiento de estos datos anteriores junto con las especificaciones técnicas de la bomba de ariete nos debe permitir realizar un diseño óptimo.

Estas especificaciones técnicas son facilitadas por la casa comercial donde se adquiere el ariete hidráulico y normalmente constan de:

- Una relación de la eficiencia del ariete respecto al ratio de las alturas:

$$\eta = \frac{q}{Q} \frac{h}{H}$$

Siendo:

η : eficiencia del ariete hidráulico

q: caudal elevado

Q: caudal de suministro

h/H: ratio entre las distintas alturas.

- Una relación de caudales respecto al ratio de alturas: basándose en la misma expresión anterior, una relación entre el caudal elevado respecto al total que atraviesa el hydram (q/Q) entre el ratio de alturas (h/H).
- La potencia de la bomba:

$$P = g \frac{q}{60} h$$

Siendo:

P: potencia de la bomba de ariete, en watios

g: aceleración de la gravedad

q: litros de agua bombeados al depósito de descarga en un minuto

h: altura del depósito de descarga

Por consiguiente, y en función de las necesidades hidráulicas que requiera el cultivo, se debe determinar el tipo de bomba de ariete a emplear, su tamaño y el número de hydrams a utilizar en la instalación para que dichos requerimientos queden satisfechos.

Tipo de bomba de ariete

En primer lugar, se debe plantear si comprar un ariete hidráulico a una casa

comercial o si construir uno en el lugar donde se va a realizar la instalación.

Este planteamiento, que no se realiza con otros tipos de sistemas de bombeo, y que puede parecer descabellado en este mundo globalizado, es un factor que favorece en muchos proyectos, sobre todo cuando se tratan de proyectos de cooperación en países en vías de desarrollo, la implantación de las bombas de ariete debido a su sencillez y facilidad en su construcción, utilizando talleres de la propia localidad o de localidades cercanas.

Este es el caso de los arietes hidráulicos DTU, promovidos por la Development Technology Unit, de la Universidad de Warwick, investigando desde 1985 los detalles constructivos, los rendimientos y la fabricación de bombas de ariete para países en vías de desarrollo, publicando gran cantidad de material para la difusión y puesta en marcha de estas bombas con el objetivo de extender su uso en lugares donde sea posible instalarlas. Gracias a su labor, podemos encontrar libros y manuales en los que se observa pormenorizadamente y con todo tipo de detalle planos para la fabricación del ariete DTU, además de información caracterizada con el funcionamiento de los hydrams.

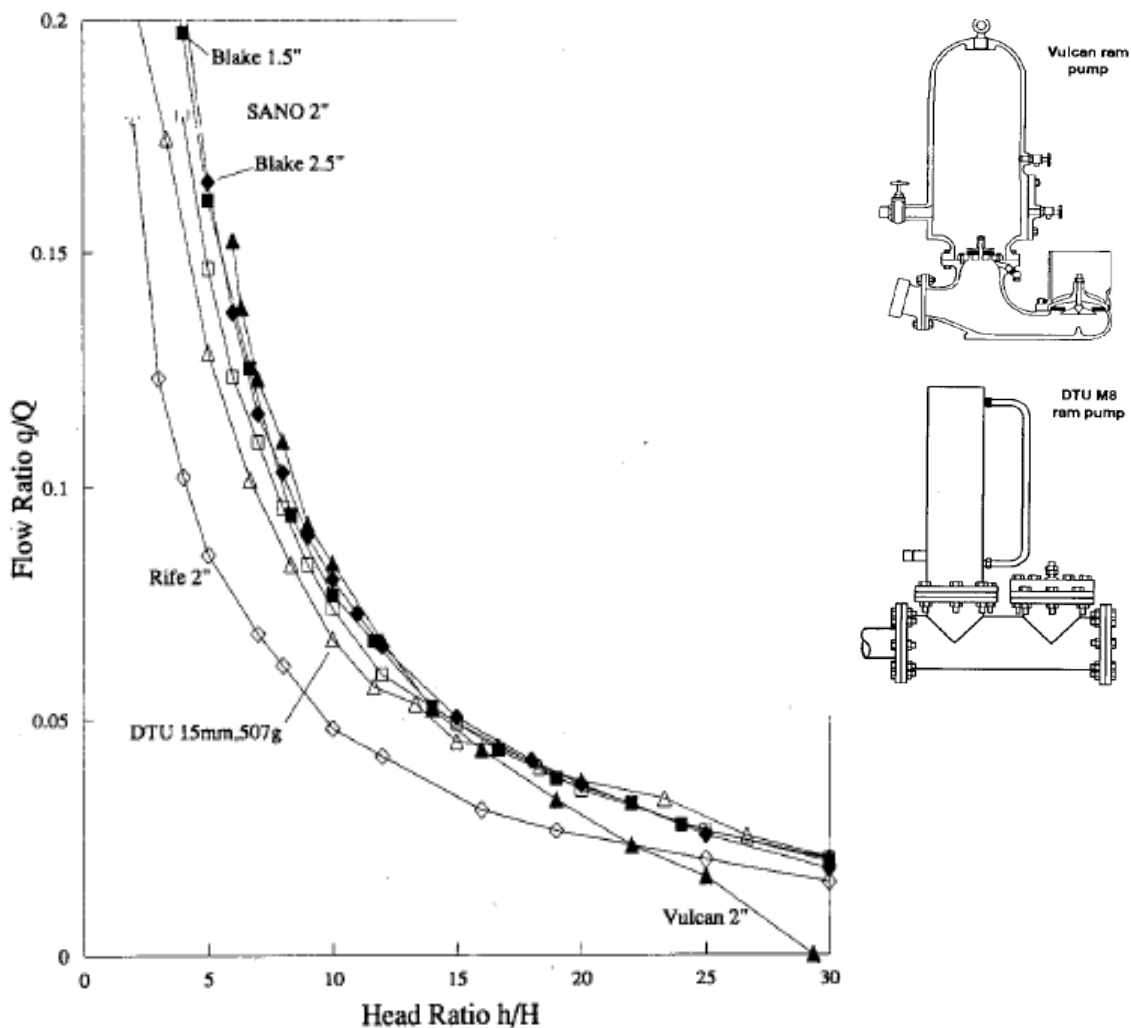


Figura 2.34. Comparación de las bombas DTU respecto a otras bombas comerciales.
[Fuente: Jeffery (1991)]

En la anterior gráfica y en el trabajo del que se extrae la misma, se puede observar como los valores del ariete de la Universidad de Warwick no tienen nada que envidiar a los obtenidos por hydrams provenientes de casas comerciales, lo que demuestra, como se ha comentado anteriormente, su aptitud para la posible fabricación en talleres locales, con un mínimo equipo, lo que conllevaría un abaratamiento considerable de la instalación al ahorrarse su compra y su importación.

Número de bombas y tamaño de las mismas

En función de las necesidades hidráulicas requeridas, de los parámetros característicos del lugar y de las características técnicas de la bomba elegida, se debe decidir, a su vez, el tamaño de los hydrams, y por ende, el número de ellos.

Debido a que, normalmente, con la instalación de un único ariete hidráulico no se satisfacen las necesidades hidráulicas, se procede a instalar varios arietes. Existen dos formas de combinar las bombas de ariete, bien en serie o en paralelo.

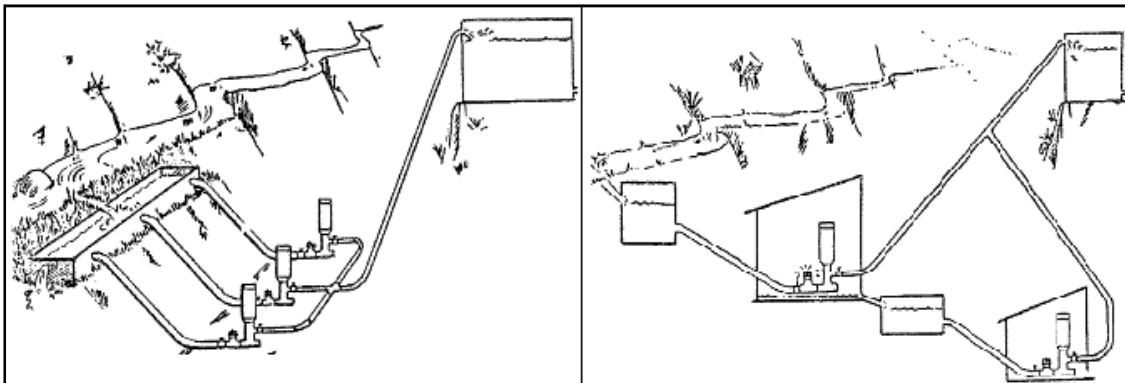


Figura 2.35. Disposición de las bombas de ariete. A la izquierda, disposición en paralelo. A la derecha, disposición en serie.
[Fuente: Tacke (1988)]

La disposición de las bombas de ariete dependerá de las condiciones del lugar a instalar. Así, en zonas donde el agua es abundante, o al menos no es muy escasa, y la demanda de agua es elevada, es recomendable utilizar hydrams en paralelo; sin embargo, en otras donde el agua sea un recurso escaso y la demanda no sea tan elevada, se utilizaría una disposición en serie con el objetivo de aprovechar el agua derramada por la válvula de impulso del ariete anterior (Chi, 2002).

Se puede diseñar una instalación con una disposición en serie cuando por circunstancias orográficas no sea posible verter aguas abajo de la fuente de alimentación el fluido derramado por la válvula de impulso y es aprovechado, a su vez, para rellenar otro depósito que al mismo tiempo alimenta a otro ariete hidráulico. Normalmente se pueden instalar tres hydrams en serie, aunque es

de señalar que el tamaño de los arietes sucesivos para este aprovechamiento será más pequeño (Chi, 2002) conforme se vaya avanzando en la serie.

Sin embargo, la disposición más usada a la hora de realizar una estación de bombeo es la paralela, como consecuencia de que el poder de bombeo que tiene es enorme al multiplicar el caudal que se impulsa por el número de arietes, con un único limitante, la fuente de alimentación debe poseer el caudal suficiente como para abastecer a los hydrams instalados (Chi, 2002).



Figura 2.36. Ocho bombas de ariete instaladas en paralelo en Dehradun, India
[Fuente: Chi (2002)]

Por ello, en función del número de bombas que dispongamos y ante las necesidades que se necesiten para un proyecto dado, corresponden un determinado tamaño de las mismas y viceversa (Watt, 1975).

Los arietes hidráulicos son fabricados en un rango de tamaño que hace referencia al diámetro de la tubería de impulso que es utilizada, y algunas veces, a la dimensión del cuerpo del ariete. No son fáciles de clasificar puesto que la misma bomba de ariete puede ser usada para elevar agua a distintas alturas desde distintas cotas, por lo que la potencia desarrollada será singular para cada instalación. Y, normalmente, tienen una baja potencia, siendo de 10 a 500 wattios. Sin embargo, instalaciones con tuberías de impulso más grandes, 8"-12", y por tanto hydrams mayores, pueden alcanzar varios kilowattios de potencia (Jeffery *et al.* 1992).

Es conveniente remarcar que Jeffery *et al.* (1992) describen que el sistema de bombeo en el que se utilizan varias bombas de diámetro más pequeño, en vez de sólo un ariete hidráulico más grande, son más eficientes y tienen una serie de ventajas durante el funcionamiento en la instalación:

Si el caudal de suministro decae como consecuencia de un periodo de sequía o por encontrarnos en la estación más seca del año se puede

parar alguna bomba con el objetivo de que la instalación siga en funcionamiento, aunque reduciendo el caudal de entrega.

Igualmente, durante las tareas de mantenimiento, se pueden realizar sin desconectar la instalación completa, sino realizar estas labores de bomba en bomba.

Las bombas de ariete más pequeñas son más fáciles de transportar a la hora de realizar una instalación nueva.

Como norma general, se puede decir que las bombas de menor diámetro, por lo general, alcanzan una mayor cota de suministro.

Sin embargo, es de señalar, que el coste inicial de la instalación puede ser mayor, debido fundamentalmente al mayor número de bombas empleadas, aunque estas sean de diámetro más pequeño.

2.8.3 Sistema de conducción

El sistema de conducción es una parte de una instalación total de bombeo con un ariete hidráulico que recibe el fluido desde la fuente de alimentación y lo transporta hasta el hydram.

Normalmente, consta de tres elementos, aunque depende de la situación general del lugar a instalar. Una tubería de alimentación transporta un determinado caudal desde la fuente de alimentación (río, acequia, depósito...) a un depósito intermedio y desde aquí, a través de la tubería de impulso, llega el agua a la bomba de ariete.

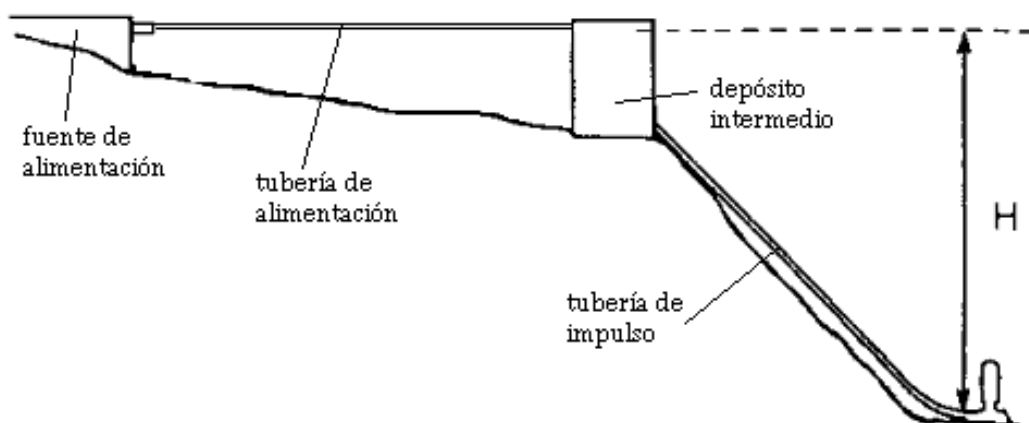


Figura 2.37. Sistema de conducción típico en una instalación con bomba de ariete
[Fuente: Jeffery *et al.* (1992)]

Depósito intermedio de alimentación

La construcción del depósito intermedio no se realiza en todos los proyectos de

bombeo con hydrams, y alimentan directamente la tubería de impulso de la fuente de alimentación. Sin embargo, es recomendable el erigirlo debido a que mientras el agua circula por un río o una acequia arrastra consigo pequeñas partículas que pueden provocar problemas, con el tiempo, en las tuberías. Al estancarse el agua en el depósito, y al disminuir notablemente su velocidad, dichas partículas se depositan en el fondo. Además, se mantiene un nivel de agua estable, asegurando un suministro regular y una altura de impulso constante, asimismo, se previene el que se introduzca aire en la tubería de impulso.

Tubería de impulso

La mayoría de las bombas están diseñadas para un diámetro de la tubería de impulso particular recomendado para usarlo bajo condiciones específicas. Por ello, la selección del diámetro de la tubería de impulso es el balance entre proporcionar un diámetro mayor con el objetivo reducir las pérdidas de carga del fluido o uno menor para que la velocidad del líquido sea mayor.

Se demuestra que un diámetro menor procura mayor eficiencia a la bomba de ariete, sobre todo cuando se mueve en rangos críticos (pequeños caudales y gran altura, por ejemplo), como consecuencia de que la velocidad a la que atraviesa el fluido es mayor (Jeffery *et al.* 1992). A lo que también hay que sumar que el coste de la tubería será más económico, aunque si se escoge un diámetro demasiado pequeño, el rozamiento producido entre las paredes de la tubería y el fluido hará caer la eficiencia del hydram considerablemente (Watt, 1975).

Sin embargo, y según apunta Thomas (1994) las pérdidas de carga ocasionadas en la tubería de impulso no deben superar el 5% de H y establece un diámetro máximo para cada caso:

Para tuberías de impulso de acero, establece la siguiente relación:

$$D \leq 600 \sqrt{Q + h}$$

Siendo:

D: diámetro [mm]

Q: caudal de alimentación [l/s]

h: altura de descarga [m]

Por otro lado, distintos autores también ponen límites a la longitud de la tubería de impulso, argumentando que una tubería de impulso corta provocaría una frecuencia en la operación muy alta, reduciendo considerablemente la eficiencia de la bomba de ariete y acortando la vida de la misma. (Jeffery *et al.*

1992). Mientras, por el contrario, una tubería de impulso demasiado larga operaría a menos golpes por minuto (Silver, 1977 y Lee, 2000), resultando ineficiente e innecesariamente cara, aunque pudiesen funcionar, en algunas situaciones, satisfactoriamente (Jeffery *et al.* 1992).

Por ello, Jeffery *et al.* (1992) describen que como norma general, es recomendable que la longitud de la tubería de impulso sea de dos a cuatro veces la altura de caída, aunque nunca siendo menor de seis metros. Dicho valor es contradicho por De Jong (1988) quien establece que la longitud debería situarse entre cuatro y siete veces la altura de suministro.

Sin embargo, Calvert (1958), Watt (1975) y Silver (1977) realizan una relación entre la longitud y el diámetro de la tubería de impulso para establecer el valor óptimo, situándolo en torno a 500:

$$150 < \frac{L}{D} < 1000$$

Drive Pipe Size (mm)	Length (meters)	
	Minimum	Maximum
13	2	13
20	3	20
25	4	25
30	4.5	30
40	6	40
50	7.5	50
80	12	80
100	15	100

Tabla 2.2. Relación entre el diámetro de la tubería de impulso y su longitud
[Fuente: Hazarika (2007)]

Otro aspecto a considerar o que se menciona en alguna publicación de manera más tímida es el ángulo que debe tener la tubería de impulso respecto a la horizontal, estableciendo un máximo de 20° (Ramón Chamba y Vallejo Herrera, 2005), aunque Jeffery *et al.* (1992) restan importancia a este aspecto al que adjetivan como “no crítico” y argumentan que es un aspecto que depende exclusivamente de las condiciones del lugar a instalar y que se solventa cumpliendo las condiciones anteriormente expuestas sobre la longitud de la tubería de impulso.

La mayoría de los autores consultados, sin embargo, coinciden en que lo más recomendable es que la tubería de impulso se proyecte para que sea de acero galvanizado.

La tubería de impulso es una parte clave en la instalación, siendo la responsable de transportar el agua desde la fuente de suministro al ariete

hidráulico, proporcionándole (como consecuencia de la diferencia de cotas) una velocidad capaz de hacer cerrar la válvula de impulso y de crear la sobrepresión (golpe de ariete). Por ello, la tubería de impulso debe ser fabricada de un material rígido, fuerte y resistente.

Pero, además de poseer las anteriores características, el acero galvanizado es una muy buena opción porque, como se puede observar en la siguiente gráfica, y se ha explicado anteriormente, la celeridad guarda relación con las características de la tubería, y ésta es la que va a determinar el aumento del valor de la sobrepresión producida. Como bien apunta Watt (1975), una instalación ideal fabricada de materiales completamente rígidos y no elásticos, ante un caso de reducción instantánea de la velocidad, incrementaría la presión producida en comparación con la que se originaría con otros materiales.

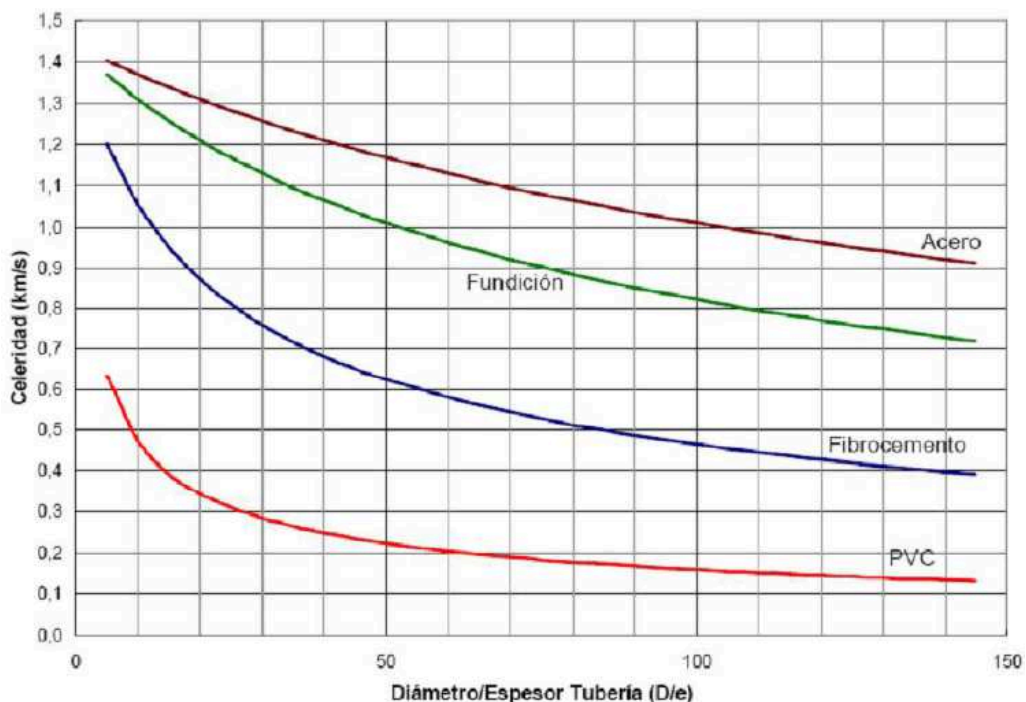


Figura 2.38. Relación entre la celeridad y el material de la tubería
[Fuente: Benavides Muñoz (2008)]

2.8.4 Sistema de entrega

Conecta la bomba de ariete con el lugar donde se va a almacenar el agua, normalmente, un depósito de descarga, a través de la tubería de descarga.

Tubería de descarga

Al igual que ocurre con las tuberías de impulso, el diámetro cuanto más grande sea, mayor será el precio de la tubería, aunque menores pérdidas de carga se producirán en la misma. Por lo que debe existir un balance entre un extremo y el otro, proponiendo Jeffery *et al.* (1992) que las pérdidas de carga en la tubería

de descarga no superen el 5-10% de la altura de elevación del fluido.

Delivery Pipe Size (mm)	Flow (liters/min)
30	6-36
40	37-60
50	61-90
80	91-234
100	235-360

Tabla 2.3. Relación entre caudal y diámetro de la tubería de descarga
[Fuente: Hazarika (2007)]

La tubería de descarga es una parte importante de la instalación y en muchos casos su elevada longitud provoca que sea el componente más caro. Por ello, es importante que la ruta elegida por la que discurre la tubería de descarga sea la más corta posible para reducir los costes y las pérdidas de carga, aunque en algunos casos ésta deba modificarse por no ser la solución técnica óptima. (Jeffery *et al.* 1992)

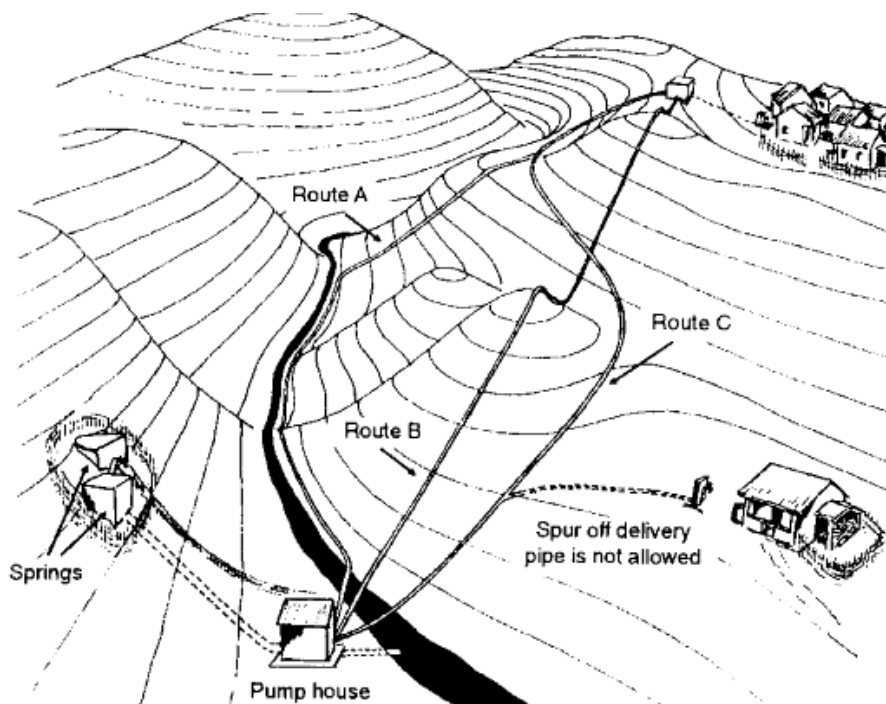


Figura 2.39. Distintas rutas o caminos posibles que puede tener la tubería de descarga para llegar al depósito de entrega. Se puede observar en la imagen como hay tres posibles: ruta A, la más larga; ruta B, la más corta y ruta C, la óptima.

[Fuente: Jeffery *et al.* (1992)]

Según Watt (1975), el agua puede ser bombeada por el ariete hidráulico a cualquier distancia, aunque bien es cierto que una tubería muy larga implica que existan pérdidas de carga mayores.

Además, es aconsejable que la tubería se encuentre protegida de las personas, animales, maquinaria agrícola... que puedan romperla. Para ello, Jeffery *et al.*

(1992) proponen que se entierre al menos 50 centímetros de profundidad.

La tubería de descarga puede ser de cualquier material (PVC, PE...), a menos que a la salida del hydram la presión sea superior a la que pueda soportar esta tubería (Watt, 1975), por lo que Tacke (1988) propone que, si se da esta circunstancia, unos primeros metros de la tubería de descarga sea de acero galvanizado y posteriormente, cuando la presión del fluido disminuya, del material elegido.

En los casos donde la instalación esté compuesta de varias bombas de ariete dispuestas en paralelo, sí que es necesario, como se describió anteriormente, una tubería de impulso propia para cada hydram, sin embargo no es necesario que disponga cada uno de una tubería de descarga individual ya que una sola es suficiente para todos los arietes de los que se disponga, aunque, según apunta Chi (2002), serán necesarios diez metros individuales antes de establecer la conexión conjunta, pudiendo ser este montaje de acero galvanizado, por ser los elementos más sensibles de la tubería de entrega a que se produzcan sobrepresiones.

Depósito de descarga

Una de las grandes ventajas del ariete hidráulico, como bien establece Watt (1975), es que trabaja automática y continuamente, lo que significa que siempre está bombeando agua al tanque de cabecera.

A la hora de diseñar este componente de la instalación, lo más significativo será el tamaño que se le de para que nunca se encuentre vacío, así como que haya que detener los hydrams, salvo en revisiones periódicas, porque se encuentre a rebosar dicho depósito.

Así pues, a la hora de dimensionarlo, es menester tener en cuenta y estimar los requerimientos de agua diarios, así como los posibles picos de consumo que se puedan producir, tanto en un día concreto, como en un determinado periodo comprendido en un año, con vistas a conseguir tener un reservorio de agua suficiente que nos asegure su abastecimiento.

2.9 Arietes hidráulicos comerciales

2.9.1 Green&Carter

Ashbrittle, Reino Unido

<http://www.greenandcarter.com/>

Green&Carter es una empresa inglesa de gran recorrido que poseyó una fundición de hierro en Kingsworthy, fabricando, ya por aquel entonces, bombas de ariete y distribuyéndolas a lo largo de todo el mundo.

En 1928, esta empresa adquirió el negocio de James Easton, compañía que comenzó la fabricación a escala comercial de los arietes hidráulicos e introdujo la bomba de ariete en Inglaterra, comprando la patente a J. Montgolfier y a J. Whitehurst.

Desde entonces hasta el día de hoy, esta empresa sólo fabrica arietes hidráulicos tipo Vulcan, variando forma y tamaño para ajustarse a las necesidades de cada cliente.



Los tamaños que fabrican son de 1.25", 1.5", 2", 2.5", 3", 4", 5", 6" y 8", admitiendo la posibilidad de fabricar otros, incluso más grandes, bajo pedido.

2.9.2 Blake Hydram

Accrington, Reino Unido

<http://www.allspeeds.co.uk/>

Blake Hydram, al igual que Green&Carter, es una empresa muy antigua que tiene su inicio en 1865 cuando John Blake crea un prototipo de ariete hidráulico para comercializar.

En la actualidad, pertenece a Allspeeds Ltd., empresa que aglutina cinco actividades distintas, con 150 años de antigüedad heredados en



el diseño y fabricación de equipos hidráulicos y mecánicos de alta calidad y con gran reputación. Blake Hydrum fabrica arietes hidráulicos de distintos tamaños poseyendo diámetros de 1", 2", 3", 3.5", 4", 5", 6", 7", 8" y 10".

2.9.3 Walton

Bordeaux, Francia

<http://www.walton.fr/>

Desde 1910, Walton se ha especializado en la gestión del agua. Esta empresa familiar es reconocida a través de sus conocimientos y experiencia en el campo de los sistemas hidráulicos, sistemas de riego y estaciones de bombeo.

Con el avance tecnológico, Walton ha ampliado su gama de ofertas. Sus proyectos de riego, fuentes, estaciones de bombeo, sistemas hidráulicos, o las instalaciones sanitarias se complementan con consejos de instalación y diseño.



Es el único fabricante francés de arietes hidráulicos tradicionales, comercializando siete tamaños distintos del ariete tipo Walton "W".

2.9.4 Schlumpf

Vilters, Suiza

<http://www.schlumpf.ch/>

Esta empresa debe su nombre a Johann Georg Schlumpf quien construyó su primer ariete en 1885 con la característica sobresaliente de tratarse del único completamente libre de mantenimiento, sin ventar y purgar.

Schlumpf, al igual que otras empresas que deben su existencia a personas que en siglos anteriores han experimentado con estas bombas, han ido mejorando día a día sus prototipos,



debido a su experiencia y al desarrollo de la tecnología.

Hoy en día, comercializa arietes de distintos tamaños: 0.5", 1", 1.5", 2", 2.5", 3" y 4", existiendo la posibilidad de fabricación de distintos tamaños especiales bajo pedido.

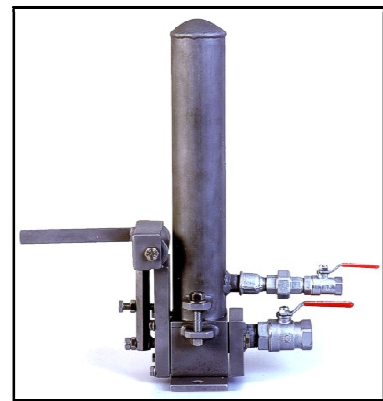
2.9.5 Zahner Metallbearbeitung

Uznach, Suiza

<http://www.wasserpumpe-widder.ch/>

Empresa suiza que tiene patentado y fabrica el ariete Wasserpumpe Widder.

Dispone de distintos tamaños de fabricación, de 1", 2", 2.5", 3", 4", 6" y 8".



2.9.6 Wama Widder

Oberneukirchen, Alemania

<http://www.wama-widder.de/>

El nombre y la patente de esta empresa alemana, Wama-widders, viene de las diferentes válvulas obtenidas de la Wa Pagne y de la Grafig Ma, de ahí el nombre WAMA.

La producción del ariete hidráulico vino más tarde con Kiehl Max. Aún después de su muerte, en diciembre de 2003, la empresa ha continuado con la producción, manteniéndose su nombre original.

Wama fabrica doce arietes de distintos tamaños que poseen un abastecimiento desde 3 litros por minuto a 600 litros por minuto.



2.9.7 Weinmann

Hersbruck, Alemania

<http://www.weinmann-online.de/>

Los arietes de esta empresa alemana, del tipo Weinmann-Universalwidder, poseen una característica que los diferencia del resto de los hydrams y es que la válvula de impulso se encuentra mirando hacia abajo, en vez que otros modelos la poseen o bien mirando hacia arriba o en el lateral.

Weinmann fabrica arietes de distintos tamaños que varían entre rangos de 1" a 4".



2.9.8 Meribah Ram Pump

Hua Doi, Tailandia

<http://www.meribah-ram-pump.com/>

Meribah Ram Pump comienza su andadura en el año 1999 cuando un grupo de personas realizan un proyecto para suministrar agua a un hogar de niños que se encuentra en lo alto de las montañas del norte de Tailandia. Inicialmente, se realizó con una bomba de agua convencional, que resultó ser, con mucha diferencia, muy costosa en términos de funcionamiento y mantenimiento.

Posteriormente, descubrieron el concepto de bomba de ariete y se compraron un número determinado de unidades disponibles en el mercado, fracasando algunas de ellas. Esta situación les llevó a desarrollar su propia bomba de ariete a base de accesorios estándar.



Con el paso del tiempo, han dedicado su esfuerzo en estudiar el comportamiento del ariete hidráulico, teniendo como objetivo principal el ser capaz de proveer a la gente de escasos recursos en las zonas rurales de un sistema de transporte sencillo, robusto y económico del agua para mejorar el nivel de vida, eliminar los riesgos de contaminación y las enfermedades del agua.

En la actualidad disponen de tres tipos distintos de bombas de ariete: uno,

heavy duty ram, de 2", y otros dos, de tipo "do it your self" de 1" y 2".

2.9.9 Rife Hydraulic Engine

Nanticoke, Estados Unidos

<http://www.riferam.com/>

Rife se funda en 1884 y desde ese año dedica sus esfuerzos a conseguir poder bombear agua sin necesidad de electricidad ni combustible.

Es una empresa de gestión familiar desde sus inicios en la que comercializa y venden arietes hidráulicos, bombas de río o bombas de nariz.



Disponen de dos prototipos de bombas de ariete: Davey Ram, el de la imagen de la izquierda y el Heavy Duty Universal Ram, el de la imagen de la derecha.

De ambos disponen de varios tamaños, variando de 1" a 4" en el HTU y de 1" a 2" en el caso del Davey Ram.

2.9.10 Centragua

Buenos Aires, Argentina

<http://www.centragua.com.ar/>

Centragua es una empresa dedicada a la venta de todo tipo de bombas para la elevación del agua, sus repuestos y reparación, con más de 25 años en el mercado.

Entre los distintos equipos que se comercializan están los Arietes hidráulicos, bombas manuales, bombas de diafragma, bombeadores y bombas centrífugas.

Disponen de cuatro tamaños distintos de arietes hidráulicos, pudiendo ser de 1", de 1.5", de 2" y de 2.5".



2.10 Dos ejemplos de bombas de ariete en Huesca

Han sido muchos los meses desde que empezamos a estudiar el funcionamiento del ariete hidráulico y desde entonces nos hemos cruzado con muchas personas que nos preguntaban interesadas “¿una bomba capaz de elevar agua sin necesidad de electricidad o combustible alguno?” como si fuéramos a descubrir algún proceso novedoso gracias a la nueva tecnología desarrollada hoy en día. Sin embargo, también nos hemos encontrado con otras que no solo conocían qué es un ariete hidráulico, sino que sabían de su funcionamiento e incluso de lugares donde está en funcionamiento.

De este modo, decidimos visitar a dos personas que utilizan este método de bombeo cerca de la ciudad de Huesca e incorporarlo en el presente documento con la intención de demostrar que es una opción válida, y por eso en estos casos es la elegida, siempre que las condiciones sean las adecuadas y satisfagan nuestras necesidades hídricas.

2.10.1 Bomba de ariete en Belsué

Belsué es un pueblo pequeño perteneciente al Ayuntamiento de Nuño, situado en la Comarca de La Hoya de Huesca a 25 kilómetros de la propia ciudad de Huesca en dirección norte.



Figura 2.40. Situación geográfica de Belsué
[Fuente: SIGPAC]

Belsué cuenta con una población de 6 habitantes según el INE, aunque a diario puede ser que lo hagan menos.

Las condiciones de vida en este municipio de La Hoya de Huesca son duras, ya que Belsué no ha dispuesto de agua, de electricidad o de alcantarillado en sus casas hasta hace muy pocos años. De este modo, el agua para el uso doméstico debía ser acarreada desde la fuente a las propias casas, como ha ocurrido en el pasado reciente en la mayoría de los pueblos.



Figura 2.41. Vista de Belsué

[Fuente: <http://www.huesca.com>, revisada en Abril de 2013]

Sin embargo, José María Aquilué, motivado por un amigo suyo, descendiente de Lacasta (Zaragoza) poseedor de una bomba de ariete para su abastecimiento de agua, optó también por este método de bombeo hace ya 35 años.



Figura 2.42. José María Aquilué mostrándonos su instalación
[Fuente: Propia]

Cuando valoraron la instalación del ariete hidráulico, decidieron fabricar su propia bomba de 1.5" con piezas soldadas debido a la experiencia y en el convencimiento de su viabilidad por parte del amigo de José María Aquilué.



Figura 2.43. José María Aquilué mostrándonos su bomba de ariete
[Fuente: Propia]

La fuente de suministro está situada en un barranco que pasa al lado del pueblo, pero a gran altura del mismo, ya que como se puede apreciar en las fotografías anteriores, la orografía del lugar es contundente.

Este barranco tiene agua durante todo el año y se aprovecha como caída de impulso una pequeña cascada que existe en un pequeño tramo en el cual el mismo cae unos 5 o 6 metros de altura en un pequeño espacio, como bien se estima en la posterior imagen.

Con la altura de caída, unos 5 metros, la longitud de la tubería de impulso, 12 metros, 6 metros de 2" y los otros seis metros restantes de 1.5", ha conseguido elevar agua a más de 80 metros de altura, a través de una tubería que tiene unos 200 metros de longitud, según el propio dueño. Además, asegura que el caudal elevado correspondía aproximadamente a 1 litro por minuto de bombeo.

Con este caudal acumulado en depósitos, situados sobre la casa de José María, asegura haber suministrado agua más que suficiente, ya que posee un sistema para devolver el agua que no utiliza de nuevo al barranco, para el consumo doméstico y para sus animales, llegando a albergar un rebaño de 300 ovejas, además de otros animales que poseía para su alimentación, pero en mucha menor cantidad, como pueden ser gallinas y conejos.

Además, el propio José María Aquilué explica, tal y como la bibliografía consultada asegura, que el mantenimiento ha sido mínimo durante estos 35 años, debido a la simplicidad aparente de la bomba. En este tiempo no ha sido

necesario cambiar ninguna pieza del ariete hidráulico y sólo ha requerido supervisión debido a que al introducirse alguna piedrecilla, hoja o palo en la tubería, saltándose el filtro, si esta queda atrapada en el lugar delimitado para la válvula de impulso, puede provocar el no cierre total de la misma y disminuir con ello notablemente la eficiencia. Pero es de señalar que este mantenimiento mínimo, muchas veces, no conlleva ni desmontar la propia válvula de impulso y simplemente abriéndola del todo, accionándola manualmente, se limpia de los posibles elementos que contenga gracias a la velocidad que alcanza el agua a través de la tubería.



Figura 2.44. Tubería de impulso de la instalación
[Fuente: Propia]

Sin embargo, el pasado invierno, tras una intensa helada, la tubería de impulso se rompió como consecuencia del cambio de estado del agua, a hielo. Este hecho, unido a que en el pueblo, desde hace ya unos años, existe suministro de agua, ha provocado que José María Aquilué no piense en cambiar la tubería y, por ello, la bomba de ariete se encuentra actualmente parada.

2.10.2 Bomba de ariete en Siétamo

Otro ejemplo de bombeo de agua con una bomba de ariete nos lo podemos encontrar en el término municipal de Siétamo.

A orillas del río Guatizalema, Juan Escartín posee un huerto que en principio no podía ser regado sin el uso de una bomba de gasoil debido a que tanto la acequia como el río están por debajo del nivel de parcela y el agua no tiene salida hacia la misma.

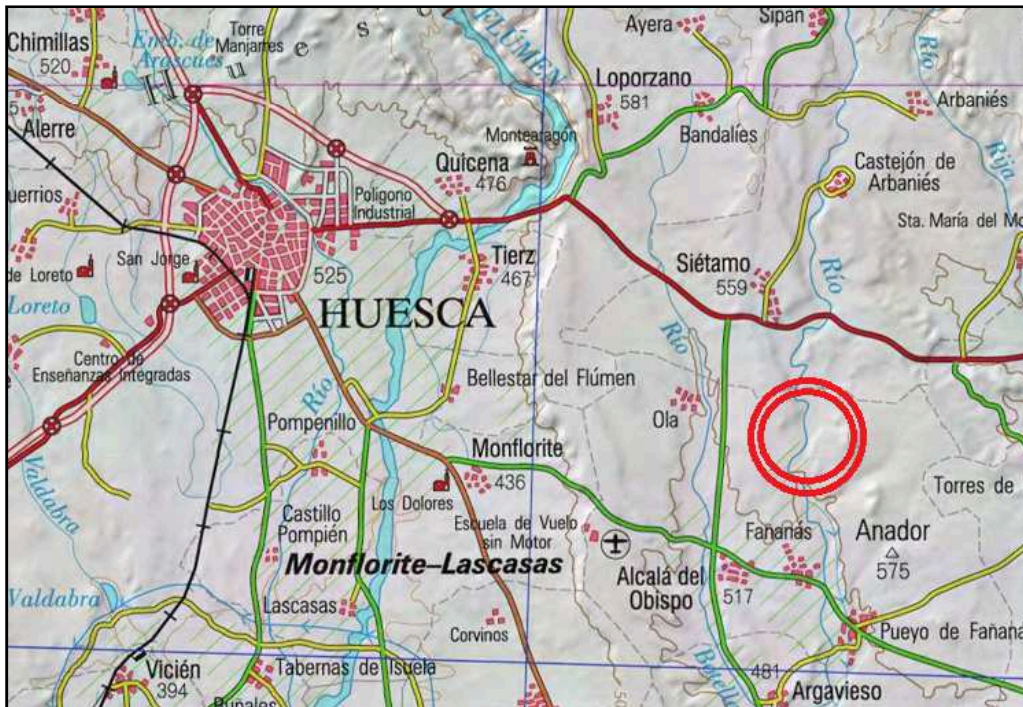


Figura 2.45. Situación geográfica del ariete hidráulico de Juan Escartín
[Fuente: SIGPAC]

Sin embargo, gracias a la instalación de un ariete hidráulico en su huerto, es capaz de regar la parcela y de obtener agua para un merendero que posee en dicho lugar.

Su parcela se encuentra entre el Río Guatzalema y una acequia, pero a una cota superior, como se ha comentado anteriormente y como se puede apreciar en la siguiente imagen.

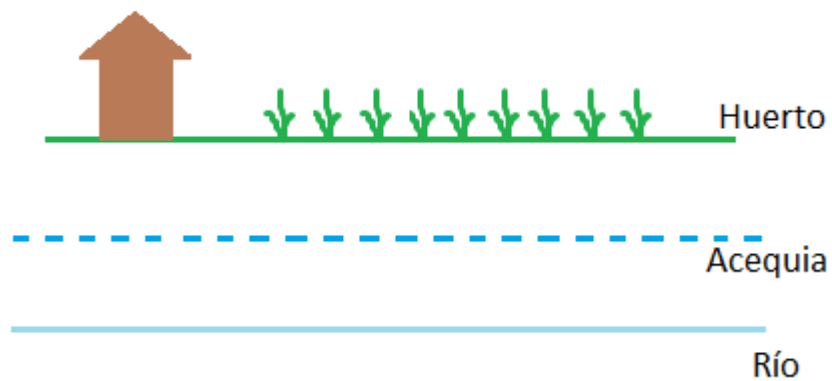


Figura 2.46. Esquema de la parcela de Juan Escartín
[Fuente: Propia]

Juan tiene una tubería que discurre desde la acequia hasta el río, que ha llenado previamente con agua. De esta manera, el agua va a circular de forma continua desde la acequia hasta el río.

Una vez que llega el agua a la orilla del río, ha optado por instalar un ariete hidráulico, y de ahí elevar el agua a unos depósitos que tiene a un nivel

superior respecto al huerto y al merendero que allí posee para poder regar el huerto y obtener agua para el merendero por gravedad.



Figura 2.47. Depósitos a los que bombea el agua para disponer de ella para el merendero posteriormente
[Fuente: Propia]

El ariete hidráulico que utiliza Juan Escartín para bombear agua a los depósitos es de fabricación propia mediante el acople de piezas de fontanería.



Figura 2.48. Bomba de ariete de Juan Escartín
[Fuente: Propia]

Su bomba de ariete es de 1" y está fabricada con piezas de acero galvanizado roscadas, así como la tubería de impulso que hace llegar el agua de la acequia también es en su totalidad del mismo diámetro de plástico, salvo en los últimos tres metros en los que Juan ha instalado una tubería de hierro.



Figura 2.49. Juan Escartín junto a su ariete hidráulico
[Fuente: Propia]

Con la caída correspondiente y las condiciones explicadas, la bomba de ariete es capaz de elevar agua de sobra para el merendero y el huerto, bombeando del orden de 2.3 litros por minuto. Por ello, Juan apunta en la visita que tuvimos con él, que en la actualidad tiene problema de almacenamiento debido a que no posee suficientes depósitos para almacenar todo el agua que bombea y por ello debe mantener la mayoría del tiempo el ariete fuera de funcionamiento o el depósito rebosando.

Dispone, en la actualidad, de cuatro depósitos de 200 litros en su parcela para el consumo de agua para el merendero y uno de 1000 litros que utiliza para el riego del huerto, encontrándose situados a una altura de unos 5.5 metros respecto a la bomba de ariete, que se ubica a los pies del río Guatizalema.

3 - METODOLOGÍA

3.1 Construcción de la bomba de ariete

La construcción o fabricación de una bomba de ariete comprende un conjunto de actividades destinadas a la realización efectiva del producto con unas condiciones de calidad, coste y tiempo. Entre estas actividades, Campaña Calero y Guamán Alarcón (2011), destacan las siguientes:

- Preparación de los procesos productivos, planificación y programación de la producción, así como la disponibilidad del equipo y utillajes necesarios.
- Fabricación de piezas y componentes, o su eventual subcontratación, y el establecimiento de las correspondientes especificaciones técnicas.
- Montaje de las piezas, subconjuntos y conjuntos, para formar el producto que corresponda a la funcionalidad.
- Control de calidad, en la recepción de los materiales y componentes, así como en los procesos de fabricación, montaje y de garantía de calidad global del mismo.
- Documentación con su respectiva garantía, manual de instrucciones y de mantenimiento.

La correcta selección de los materiales, sobre la base de sus propiedades, al lado de su disponibilidad y coste, es la consideración principal y la que pueda prolongar en el tiempo la vida útil de las bombas. Además, cuando el ariete está bien construido y debidamente instalado el mantenimiento es mínimo. Para ello, la construcción del equipo se puede realizar en un taller mecánico medianamente equipado con soldadura, taladro de pedestal, esmeril, equipo de oxicorte, torno, fresadora y equipo de pintura, entre los más relevantes. Así también es de recibo que las personas que trabajen en la construcción de la bomba de ariete deban estar capacitadas para seguir las indicaciones marcadas.

Sin embargo, acorde a los medios que disponemos en nuestro Centro, no pudiendo manufacturar un ariete hidráulico debido a que no se dispone de un taller para ello ni del conocimiento en soldadura que requiere, se procede a la construcción de una bomba de ariete mediante el acople de distintas piezas de fontanería, las cuales se puedan encontrar fácilmente en cualquier empresa que se dedique a ello.

A pesar de esta circunstancia, se proceden a elegir los materiales que mejor se adapten a la construcción del ariete hidráulico con el fin de obtener el mejor resultado posible acorde a las herramientas que se poseen.

3.1.1 Diseño de la bomba de ariete

Son escasos los escritos que muestran cómo fabricar uno mismo un ariete hidráulico con materiales de fontanería, o con otros materiales con los que no sea necesario disponer de un taller equipado, en términos descritos anteriormente.

Así, en la bibliografía consultada podemos encontrar gran cantidad de artículos que explican el funcionamiento general del ariete hidráulico, determinados aspectos que influyen en el correcto funcionamiento del mismo e incluso planos para la construcción, en taller, de un ariete que ofrezca garantías de ser, al menos, tan competitivo como los comerciales, como muestra el trabajo de Jeffery (1991).

Sin embargo, cuando se trata de construir una bomba de ariete con piezas y materiales de fontanería roscados es difícil disponer de trabajos que resulten fiables, debido a que describen los procesos, por lo general, demasiado simplificados, obviando aspectos muy influyentes en el rendimiento y en algunas ocasiones, realizando un diseño muy farragoso o de dudosa aplicación. Además, se debe tener en cuenta que hay piezas que se van a utilizar, como la válvula de impulso, que tienen otro comportamiento o se usan para otras funciones normalmente y modificar su uso para hacerlas aplicables en la construcción de la bomba de ariete se trata de un proceso muy delicado.

Por ello, para la construcción de nuestra bomba de ariete, hemos tenido en cuenta, además de la bibliografía consultada, la ayuda y experiencia de Juan Escartín, que desde hace tres años riega su huerto, situado a los pies del Río Guatizalema, en Siétamo (Huesca), con una bomba de ariete, con el fin de describir un método sencillo para la construcción de un ariete hidráulico.

De tal modo, se van a ir describiendo y mostrando en el presente apartado qué materiales se han utilizado, además de mostrar en el Anexo I el procedimiento para la construcción de la bomba de ariete, con el ánimo de determinar un método sencillo para la misma que pueda ser imitado y repetido con el mismo éxito que podamos obtener en nuestros resultados, recordando nuevamente que la eficiencia del hydram no depende únicamente de la bomba en sí, sino de múltiples factores que se han descrito en los capítulos anteriores con el afán de comprender el funcionamiento así como los aspectos técnicos que influyen en el mismo.

3.1.2 Tamaño del ariete hidráulico

El tamaño de una bomba de ariete se da en pulgadas y es considerado según sea el diámetro del cuerpo de la misma.

En un principio, el ariete hidráulico a construir en el presente Proyecto Final de Carrera iba a tratarse de un ejemplar de dos pulgadas por ser el tamaño más extendido comercialmente hablando, pero observando la diferencia de precio, más que notable, entre hacerlo de dos o de una pulgada, y no existiendo diferencia, a la hora de compararlo con otras bombas comerciales, como consecuencia de que casi todas las casas comerciales fabrican también a este tamaño, se ha optado finalmente por hacerlo con una dimensión de una pulgada.

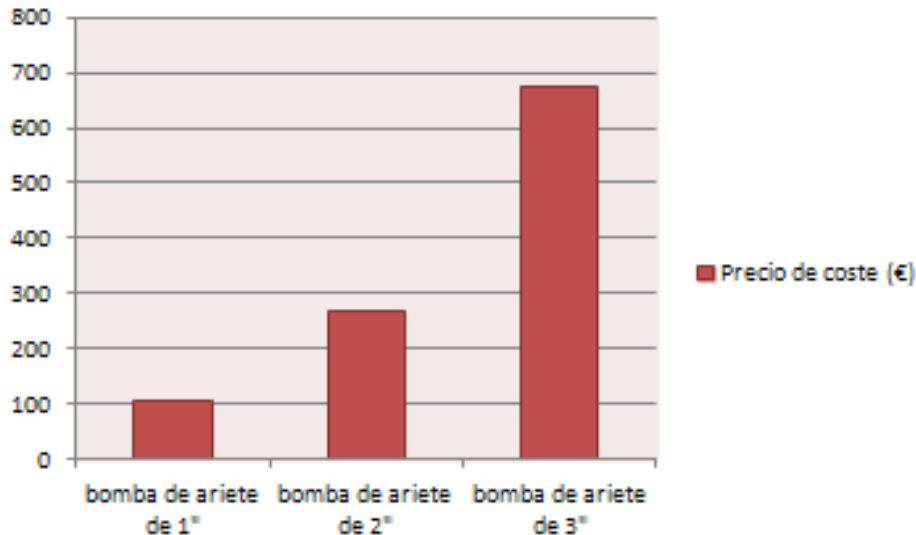


Figura 3.1. Comparativa del precio de coste aproximado para la construcción de bombas de ariete de distinto tamaño con materiales de fontanería

[Fuente: Propia]

3.1.3 Partes del ariete hidráulico construido

Cuerpo de la bomba de ariete

Es el lugar donde se produce la inversión de la onda de presión, donde se ubican las válvulas de impulso y de descarga, y a su vez es la base de asientos y ubicación de los elementos del ariete.

Debido a que en este componente del ariete hidráulico es donde se va a producir el fenómeno del golpe de ariete, provocado al cerrarse la válvula de impulso como consecuencia de la velocidad adquirida por el fluido, interesa que el material con el que esté construido sea de acero galvanizado con la finalidad de que la celeridad de la onda sea lo más alta posible, evitando que la sobrepresión se disipe.

El cuerpo de la bomba de ariete estará construido por una llave de bola, un nipple, una T y una curva de 90°, todos ellos de una pulgada de diámetro, y de acero galvanizado, acorde lo establecido anteriormente.



Figura 3.2. Cuerpo del ariete hidráulico
[Fuente: Propia]

Válvula de impulso

Va a ser la encargada de producir el golpe de ariete como consecuencia al cierre brusco que se produce por el efecto del incremento de la velocidad del agua en la tubería de suministro y que vence el peso de la misma.

Esta válvula es uno de los componentes más sensibles del ariete hidráulico y una selección correcta de la misma garantizará un funcionamiento eficiente. Por ello, los criterios de valoración que se considerarán más importantes en el diseño de la válvula de impulso, serán: su sensibilidad, debido a que este aspecto influye en una correcta operación del ariete; su fiabilidad, debiendo operar en un periodo conveniente; su fácil regulación, para aumentar con ello el caudal elevado o la eficiencia; su precio, debiendo ser moderado en la medida de lo posible y su fácil montaje, así como que los procesos de construcción no sean complejos (Campaña Calero y Guamán Alarcón, 2011).

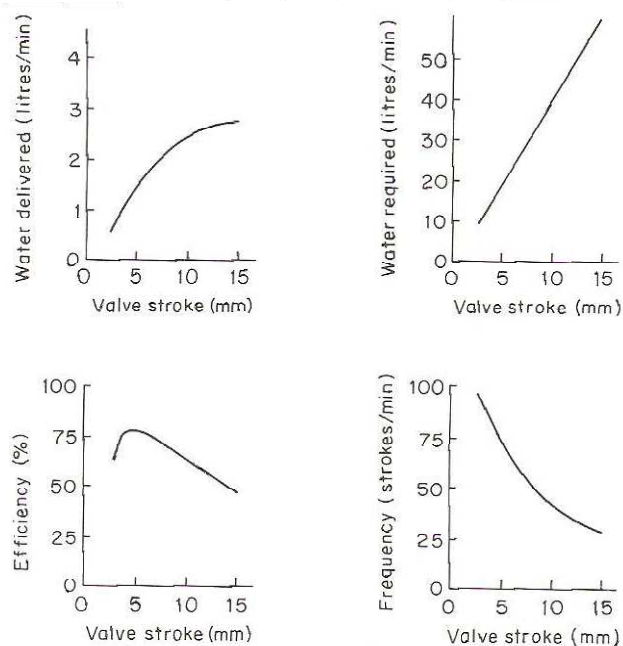


Figura 3.5. Efecto de la longitud de la carrera del vástago de un ariete hidráulico en el agua bombeada, en el agua requerida, en la eficiencia y en el número de golpes por minuto.
[Fuente: Azoury (1992)]

La válvula de impulso, por ende, suele estar fabricada, en los distintos prototipos de las bombas de ariete, de forma individualizada para cada tipo, dependiendo de los medios de los que se dispongan y el fin mismo. De tal modo, para la fabricación de arietes con distintas piezas de fontanería, al no existir ninguna pieza que imite el funcionamiento de una válvula de impulso, se debe modificar una válvula no retorno para cambiar su comportamiento y de este modo fabricar una que ejerza la función y el comportamiento de la válvula de impulso lo más sensible y fiable posible, aunque esto último es tremendamente complicado debido a que estamos cambiando el comportamiento de una pieza manufacturada en una fábrica para ese fin.

Su sensibilidad, su fácil regulación y su fácil montaje son aspectos que consideraremos fundamentales a la hora de fabricar nuestra válvula de impulso y según muestran distintos trabajos, Cahyanta, Y. A. y Mandagi, A. W. (2011), Bustamante Ojeda, A. y Quezada Chunchu, M. E. (2009), así como Azoury, P.H. (1992), hay factores concretos que determinan la eficiencia de la bomba de ariete que dependen directamente de la válvula de impulso, como pueden ser el peso de la misma o la carrera del vástago o del muelle, además de aspectos mecánicos y de diseño citados anteriormente.

Existen varios modelos de válvulas no retorno, y estudiado cuales se podían aplicar a nuestro proyecto, se ha decidido estudiar tres posibles válvulas:

- Modificación de válvula no retorno tipo York (Anexo II)



Figura 3.3. Válvula de impulso modificando una válvula no retorno tipo York
[Fuente: Propia]

- Válvula no retorno tipo clapeta: para emplear esta válvula como válvula de impulso no es necesario ninguna modificación de la válvula,

simplemente cambiar su sentido para que el agua cierre la clapeta cuando llegue el agua del depósito de alimentación, y al instante, cuando la presión se disipa es capaz de abrirse de nuevo.



Figura 3.4. Válvula de impulso con una válvula no retorno tipo clapeta
[Fuente: <http://www.velomanindustrial.com/>, revisada en Abril de 2013]

- Modificación de una válvula no retorno tipo Kent (Anexo III)



Figura 3.5. Válvula de impulso modificando una válvula no retorno tipo Kent
[Fuente: Propia]

En el presente Proyecto Final de Carrera estudiaremos las tres opciones con el fin de obtener un resultado satisfactorio, encontrar una que se adecue correctamente al funcionamiento del ariete hidráulico para que pueda ser imitada en otros trabajos o en aplicaciones a pequeña escala.

Válvula de descarga

Válvula no retorno que comunica el cuerpo del hydram con la tubería de descarga y la cámara de aire.

Su apertura se produce como consecuencia de la sobrepresión ocasionada cuando la válvula de impulso se ha cerrado, permitiendo el paso del fluido hacia el depósito de descarga pero no su retorno hacia el cuerpo ariete hidráulico.

Por lo tanto, esta válvula debe permitir el paso sólo en una dirección y poseer una gran sensibilidad a los cambios de presión con el objetivo de que el rendimiento del ariete no se pueda ver afectado como consecuencia de la fuerza de más que debería realizar el fluido para ocasionar la apertura de la válvula descrita.

Como consecuencia, la válvula no retorno tipo clapeta va a ser la más aceptada a la hora de cumplir esta condición debido a la sencillez del diseño y a su gran sensibilidad para dejar ser atravesada por el fluido en dirección al vaso de expansión para ser bombeada al punto deseado.



Figura 3.6. Válvula no retorno tipo clapeta

[Fuente: <http://www.velomanindustrial.com/>, revisada en Abril de 2013]

Además, es posible añadir en la misma, una válvula de purga de aire (descrita anteriormente como válvula de aire) acoplada a ella, con la finalidad de inyectar el posible aire que se haya podido disolver en el agua mediante este dispositivo con el fin de compensarlo. De tal forma que, gracias al efecto Venturi, cada vez que el fluido atraviesa la válvula de descarga, es succionada una pequeña cantidad de aire del exterior para asegurar que en el calderín siempre haya aire. De modo contrario, la cámara podría acabar saturada de agua, ocasionar progresivamente una disminución del rendimiento de la bomba y finalmente el paro de la misma.

Sin embargo, en nuestro caso, se va a utilizar como cámara de aire un vaso de expansión, no siendo necesaria esta válvula debido a que este dispositivo posee una membrana en su interior que separa el agua del volumen de aire,

impidiendo que se mezclen, y por lo tanto que este último sea disuelto en el agua.



Figura 3.7. Válvula de purga de aire acoplada en una válvula no retorno
[Fuente: Acitorés Martínez (2012)]

Calderín o cámara de aire

Dispositivo que regula el flujo de agua hacia la tubería de descarga y sirve de amortiguador al contener un volumen de aire separado del fluido por una membrana.



Figura 3.8. Vaso de expansión
[Fuente: <http://www.mecalia.com/>, revisada en Abril de 2013]

El aire contenido en el vaso de expansión tendrá la finalidad de recoger de forma continuada los golpes de cada ciclo y liberar toda esa energía, progresivamente, durante todo el periodo de funcionamiento de la bomba, para obtener un flujo cuasi continuo.

Además, tiene un efecto amortiguador al absorber las posibles sobrepresiones a las que se pueda ver sometido el ariete en instantes puntuales, como consecuencia de que aunque los golpes sean constantes, pueden existir

sobrepresiones mayores que otras.

Normalmente, en la mayoría de los arietes que se pueden observar y de los trabajos que se pueden estudiar, se usa como cámara de aire una tubería de un diámetro y longitud mayor que el cuerpo del ariete con el objetivo de crear un espacio que no sea conquistado por el fluido donde exista un determinado volumen de aire que ejerza estas funciones.

Sin embargo, Juan Escartín considera el vaso de expansión una buena opción, incluso por encima de la dada por la mayoría de los trabajos donde una tubería de mayor diámetro es la elección preferida.

De este modo, el problema de que el aire contenido en el calderín pueda ser disuelto en el agua bombeada pierde trascendencia debido a que la membrana que dispone este dispositivo lo impide.

3.2 Caracterización hidráulica de la bomba de ariete

En el presente apartado se trata de explicar cómo se han realizado las pruebas a la que ha sido sometida la bomba de ariete construida anteriormente con el afán de obtener una serie de resultados que nos servirán para comparar su comportamiento respecto a otros arietes hidráulicos.

En la caracterización de la bomba de ariete, se realizarán una serie de ensayos en unas determinadas condiciones que se detallarán a continuación en el que se variará la altura de elevación, con el ánimo de prestar atención al hecho de cómo el caudal elevado no es el mismo a una altura que a otra, disminuyendo conforme aumenta la altura y el efecto del rendimiento conforme a dicha variación. Además, también se establecerá cual de las tres válvulas de impulso es la adecuada en este caso.

3.2.1 Diseño y montaje de la instalación

La caracterización hidráulica de nuestra bomba de ariete se ha realizado en la cara sur-oeste del edificio Guara de la Escuela Politécnica Superior de Huesca.



Figura 3.9. Lugar de la EPSSH donde se ha realizado la caracterización hidráulica
[Fuente: <http://www.ciencias.unizar.es/>, revisada en Abril de 2013]

Depósito de alimentación

El depósito de alimentación es el lugar desde donde se va a canalizar el agua en sentido a la bomba de ariete para que posteriormente sea impulsada al punto elegido.

Para ello se ha elegido una garrafa de 25 litros a la que se le ha realizado una perforación en la parte inferior por la cual va conectada la tubería de impulso al depósito de alimentación, además de una obertura en la parte superior para introducir la manguera que va a llenar el depósito, con el fin de mantener una altura constante para que la presión también lo sea.



Figura 3.10. Depósito de alimentación
[Fuente: Propia]

El hecho de que en la imagen anterior se observen más garrafas es porque, al contrario de lo que pensábamos, el caudal que atraviesa la manguera naranja que es la que abastece al depósito de agua y que viene desde los baños, es menor a la descargada a través de la tubería de impulso durante el funcionamiento de la bomba de ariete, por lo que debían estar las garrafas de 25 litros adyacentes llenas de agua para ir vertiendo el fluido en el depósito de alimentación, y así con ayuda de la manguera, mantener el nivel de altura constante, es decir, rebosando.

A su vez, y como se puede apreciar en la fotografía anterior, el depósito de alimentación se ha situado, para la caracterización hidráulica en el puente que da acceso al edificio, concretamente en el tercer escalón del mismo, encontrándose a una altura de 3.30 metros sobre la bomba de ariete.

Tubería de impulso

La tubería de impulso constituye un componente muy importante dentro de la instalación debido a que de ella van a depender diversos factores, y por lo tanto, el resultado de los ensayos.

Pudimos observar y nos comentó José María Aquilué, propietario de la bomba de ariete de Belsué (Huesca) más tarde, después de realizar la caracterización hidráulica de nuestra bomba de ariete, el largo tiempo que les llevó el poner en

marcha definitivamente su ariete hidráulico debido a que no terminaban de acertar con la instalación de la tubería de impulso. Más de un año de pruebas. En el cual, al principio tenían una tubería de impulso más corta y con mayor inclinación, y a base de pruebas, finalmente, la tubería era de 12 metros de longitud, de los cuales los 6 metros primeros son de 2" y los 6 metros restantes son de 1,5" consiguiendo bombear el agua a más de 80 metros de altura. Este apunte es una reflexión para ver lo caprichosa que puede ser la bomba de ariete pero como pensando y cambiando algunos factores podemos conseguir nuestro objetivo.

La tubería de impulso va a transportar el agua, convirtiendo la energía potencial del fluido en energía cinética, hacia la bomba de ariete, a una velocidad determinada dependiente del diámetro de la tubería y de la altura del nivel de agua en el depósito de alimentación.



Figura 3.11. Tubería de impulso
[Fuente: Propia]

Se decidió finalmente que la tubería de impulso fuera de acero galvanizado, debido a que como se ha explicado anteriormente en el presente Proyecto Final de Carrera, dicho material favorece que la onda de presión sea mayor que con otros materiales, por lo que la sobrepresión generada en el golpe de ariete debiera ser mayor; de 5 metros de longitud, mediante el acople de cinco nipples de acero galvanizado de 1 metro cada uno y de 1" de diámetro el conjunto de la tubería.

Bomba de ariete

La bomba empleada en la caracterización hidráulica ha sido la construida para el Proyecto, con alguna modificación para observar su comportamiento durante los ensayos.

A la misma, descrita en el Anexo I, se le han acoplado dos manómetros con la intención de poder observar cómo va variando la presión del fluido respecto al tiempo en el lugar correspondiente.

Se decidió colocar un manómetro en el cuerpo del ariete, entre la válvula de impulso y la de descarga para ver la sobrepresión producida en el cuerpo del ariete cuando se produce el golpe de ariete al cierre de la válvula de impulso. También se decidió colocar otro antes de la tubería de descarga con el fin de tener una idea de a qué altura puede ser bombeada el agua teniendo una relación de presión con altura.



Figura 3.11. Bomba de ariete con los manómetros y la válvula de impulso tipo Kent
[Fuente: Propia]

La bomba de ariete se ha instalado en el foso que rodea al edificio con la finalidad de obtener esos 3.30 metros de altura en relación al depósito de alimentación.

Para garantizar la sujeción del ariete hidráulico se ha optado por soldar una pieza que lleva en la parte superior una abrazadera que podemos adaptar al cuerpo de la bomba para que quede, además de sujeta, en alto, con el fin de poder recoger el agua desperdiciada para poderla medir posteriormente.

Tubería de descarga

La tubería de descarga va a ser el medio físico por el que el agua va a ser bombeada desde el ariete hidráulico hasta el punto indicado como lugar de descarga.

Es el único parámetro que va a variar de los elementos componentes de la instalación de la bomba de ariete, para lo que aprovecharemos las distintas plantas del edificio de la Escuela Politécnica Superior de Huesca.

Se trata de una tubería de PE de 25 metros de longitud y de media pulgada de diámetro para que las pérdidas de carga en la misma sean casi despreciables.



Figura 3.12. Tubería de descarga
[Fuente: Propia]

3.2.2 Técnica de medida empleada en la caracterización hidráulica

En este punto se van a detallar los elementos de medida de los cuales se han servido para realizar la caracterización hidráulica en la EPSH.

- Recipiente para la recogida sobrante del agua: la bomba de ariete, durante su funcionamiento, expulsa un determinado caudal de agua que no va a ser bombeado. Este caudal lo recogeremos y se contabilizará con dicho recipiente.



Figura 3.14. Recipiente utilizado para la recogida del agua sobrante
[Fuente: Propia]

- Garrafas de 2 y 5 litros con marcas cada 0,5 litros para verter y medir el caudal derramado.

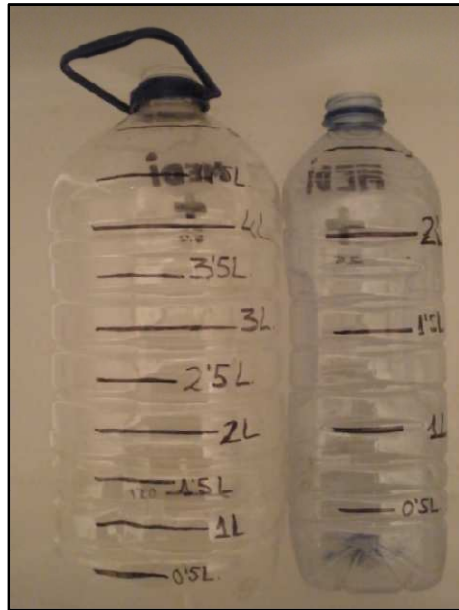


Figura 3.14. Garrafas de 2 y 5 litros empleadas durante la caracterización hidráulica
[Fuente: Propia]

- Vaso de precipitados que se emplea para medir el caudal bombeado debido a que es un caudal mucho menor y requiere ser mucho más exhaustivo.
- Cronómetro para marcar un tiempo definido y que todas las muestras tengan la misma duración.
- Cámara de fotos y de video con la intención de realizar fotos y videos durante la caracterización hidráulica tanto para incluirlas en el presente Proyecto Final de Carrera como para observar el comportamiento del ariete en casa más detenidamente.

3.2.3 Procedimiento realizado durante la caracterización hidráulica

- 1.- Se rellena el depósito de alimentación hasta que rebose, así como las garrafas que se encuentran en dicho lugar para ayudar a la manguera suministradora y que la presión varíe lo menos posible, intentando tener una altura constante.
- 2.- Se deja funcionar libremente la bomba de ariete un tiempo no determinado hasta que la tubería de polietileno empieza a descargar el agua, y se observa un ciclo continuo y estable.
- 3.- A continuación, se recoge, durante 30 segundos, por un lado, el agua bombeada en un vaso de precipitados y el agua derramada por la

bomba de ariete en el recipiente verde.

4.- Se miden los caudales respectivos, conociendo que:

$$Q = Q_w + q$$

donde:

Q: caudal de suministro.

Q_w : caudal derramado por la bomba de ariete.

q: caudal bombeado.

5.- Se apuntan en el cuaderno de campo los resultados obtenidos.

6.- Se repite el ensayo dos veces más con el fin de disminuir posibles errores de procedimiento o de medida.

4 - RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Efecto de la válvula de impulso en el comportamiento de la bomba de ariete

Como se ha comentado en el presente documento, y hemos podido comprobar, tanto con José María Aquilué como con Juan Escartín, así como con otras personas que conocen su funcionamiento, es que fabricar una válvula de impulso que sea realmente eficaz es muy complicado y más aún si se hace sin un taller bien equipado y sin los conocimientos en soldadura, principalmente, suficientes.

4.1.1 Válvula de impulso mediante la modificación de una válvula no retorno tipo York

Con esta válvula no tuvimos suerte y debido a la fuerza con la que actúa la bomba de ariete, se rompió.

Debido a la fuerza que posee la columna de agua, con la que golpea la válvula, del peso acoplado a la misma y fruto del orificio que le realizamos en el vástago de la misma, donde va acoplada la varilla roscada de 3 mm, han sido los aspectos que han podido provocar la rotura de la junta de goma que sella el cierre.

Por ello, decidimos que debíamos de construir una válvula de impulso mucho más robusta, a la cual se le pudiera añadir peso sin que la misma sufriera demasiado y que poseyera el cierre de la válvula no retorno de una única pieza para que al taladrar y roscar la varilla no ocurriera lo mismo y evitar que la válvula se rompiera de nuevo.

4.1.2 Válvula de impulso con una válvula no retorno tipo clapeta

El añadir esta válvula no retorno, que es la misma que la empleada como válvula check o de descarga, como válvula de impulso es muy común a la hora de fabricar bombas de ariete *caseras*, donde no exista una altura de suministro o de impulso muy elevada y donde el caudal quiera ser bombeado a no mucha altura.

El acople de esta válvula de impulso no necesita de ninguna modificación de la válvula no retorno, sino que simplemente se cambia el sentido de la misma. De este modo, la clapeta de la válvula queda abierta y al llegar la columna de agua, se cierra por acción de esta última provocando el fenómeno conocido como golpe de ariete.

En nuestro caso, tampoco ha funcionado esta válvula no retorno de tipo clapeta como consecuencia de que la altura de suministro a la cual se encontraba el depósito de alimentación era demasiado elevada. En el momento que

probamos y disminuimos esa altura, la bomba de ariete funcionaba y el caudal era elevado.

Durante la caracterización hidráulica ocurría que la válvula no retorno tipo clapeta se encontraba abierta, pero una vez abierta la llave que dejaba circular el fluido por la tubería de impulso, la columna de agua llegaba a la válvula y esta se cerraba. Al momento, se abría muy poco y ya se cerraba de forma definitiva, provocando la parada de la bomba de ariete.

Esto se produce así porque cuando se produce la sobrepresión en el cuerpo del ariete hidráulico, conocido como golpe de ariete, la celeridad de la onda se va propagando por el cuerpo del hidram y por la tubería de impulso provocando la apertura de la válvula check y la disipación de dicha sobrepresión, momento en el cual la válvula de impulso debería volver a abrirse, venciendo con su peso la fuerza del agua. El problema es que la válvula no tiene ese peso suficiente, en las condiciones expuestas, por lo que la bomba se paraba.

Se intentó mediante el acople de imanes, a ambos lados de la clapeta, añadir peso a la válvula de impulso y se observó que mejoraba ligeramente, pero en ningún caso era opción de tener en cuenta ese funcionamiento porque los ciclos no eran constantes y acababa parándose.

Así, que mientras la altura de trabajo fuese de 3.30 metros de altura, a la cual se encontraba el nivel del agua del depósito de alimentación, esta válvula no retorno aplicada como válvula de impulso no servía.

4.1.3 Válvula de impulso mediante la modificación de una válvula no retorno tipo Kent

Con el éxito obtenido con las dos válvulas de impulso anteriores, que supuestamente íbamos a comparar y de las que no pudimos sacar ningún resultado experimental como consecuencia de que la una se rompió y la otra no funcionaba en las condiciones iniciales, se decidió el construir una nueva, modificando una nueva válvula no retorno, pero lo suficientemente robusta y fuerte, siendo conscientes de la fuerza del agua y de lo que debía soportar.

De este modo, preguntamos a Juan Escartín, como había realizado su válvula de impulso y qué válvula no retorno había modificado.

La válvula no retorno tipo Kent, que en un principio se había rechazado por creer que podría tener muchas oscilaciones a la hora de encontrarse la bomba de ariete funcionando, se convirtió en nuestra nueva opción.

Como se muestra en el Anexo III, en la modificación de la válvula no retorno tipo Kent en válvula de impulso, se tuvo muy en cuenta el intentar hacer una válvula más robusta y fuerte e intentar evitar el punto débil que le habíamos

encontrado en un principio a la misma, su posible oscilación.

Esta válvula de impulso se probó en los ensayos de la caracterización hidráulica con resultado positivo ya que además de ser robusta, permitía ajustar la carrera de la válvula, así como el acople o la retirada de pesos en forma de tuercas o elementos de hierro para añadirle a la misma más o menos masa. Factores ambos dos influyentes en la eficiencia de la bomba de ariete pero que en el presente trabajo no procedimos a cuantificar.

4.2 Efecto de la altura de elevación

La altura de elevación, h , tiene una importancia mayúscula a la hora de poder bombear agua, influyendo notoriamente en el caudal elevado, así como en el rendimiento.

Manteniendo las condiciones iniciales y empleando la válvula de impulso que funcionó en el ensayo previo a la caracterización hidráulica, se variaron las distintas alturas de bombeo para observar cómo variaba el caudal elevado.

Condiciones iniciales:

Altura de suministro: 3,30 m.

Longitud de la tubería de alimentación: 5 m.

Diámetro de la tubería de alimentación: constante: 1”.

Válvula no retorno tipo Kent modificada como válvula de impulso.

Alturas de elevación: se prueba a bombear el agua desde el depósito de alimentación a tres alturas distintas, tomando como cero para todas las medidas siguientes la bomba de ariete, es decir, el foso del edificio de la Escuela Politécnica Superior de Huesca:

Primer piso del edificio Guara de la EPSH, aulas: 5 metros.

Segundo piso del edificio Guara de la EPSH, laboratorios: 9 metros.

Azotea del edificio Guara de la EPSH: 17 metros.

4.2.1 Resultado experimental

Para 5 metros de altura:

Caudal elevado: 0.65 litros en 30 s.

Caudal derramado: 10 litros en 30 s.

Caudal suministrado: 10.65 litros en 30 s.

Rendimiento: 9.25%.

Para 9 metros de altura:

Caudal elevado: 0.26 litros en 30 s.

Caudal derramado: 8 litros en 30 s.

Caudal suministrado: 8.26 litros en 30 s.

Rendimiento: 9.54%.

Para 17 metros de altura:

Caudal elevado: 0 litros

Los resultados obtenidos dibujan una serie de gráficas en las que podemos observar la tendencia de la bomba de ariete y su comportamiento frente a la variación de la altura de bombeo.

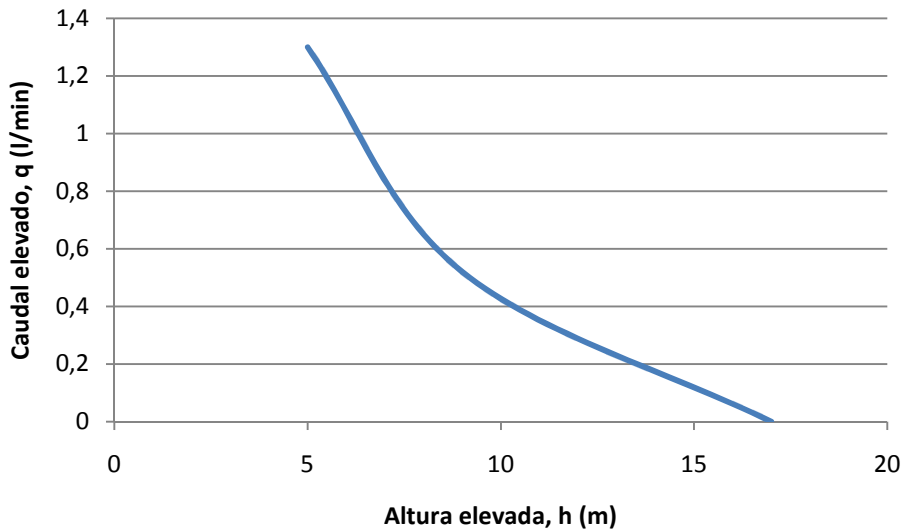


Figura 4.1. Relación entre el caudal elevado o bombeado y la altura de descarga
[Fuente: Propia]

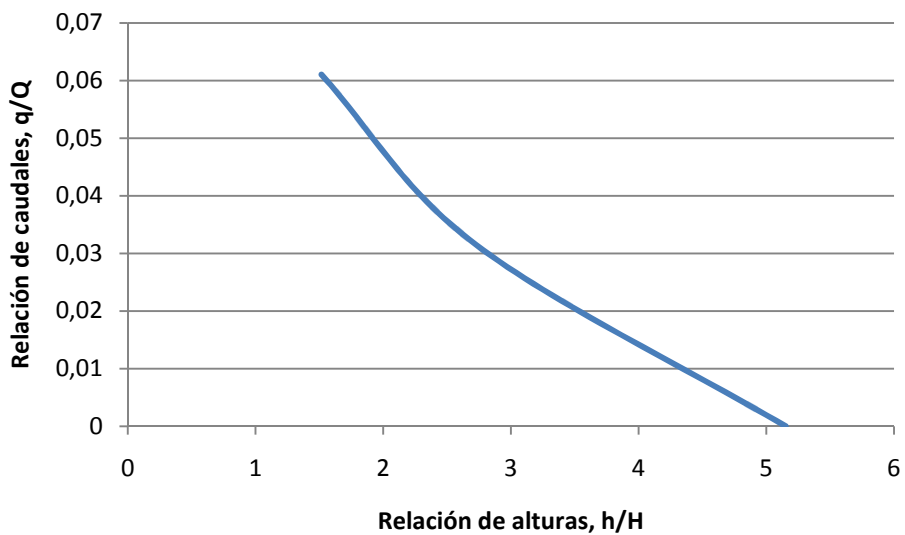


Figura 4.2. Relación entre caudales respecto a la relación de alturas
[Fuente: Propia]

Las anteriores gráficas relacionan, por un lado, el caudal bombeado, expresado en litros/minuto, en relación a la variación de la altura de elevación y, por el otro, una relación de caudales respecto a la relación de alturas de bombeo.

Del mismo modo, y aplicando la fórmula para hallar el rendimiento de la bomba de ariete, es interesante, a su vez, hacerla visible, con el ánimo de observar la tendencia que adquiere el rendimiento del ariete hidráulico respecto a la altura bombeada.

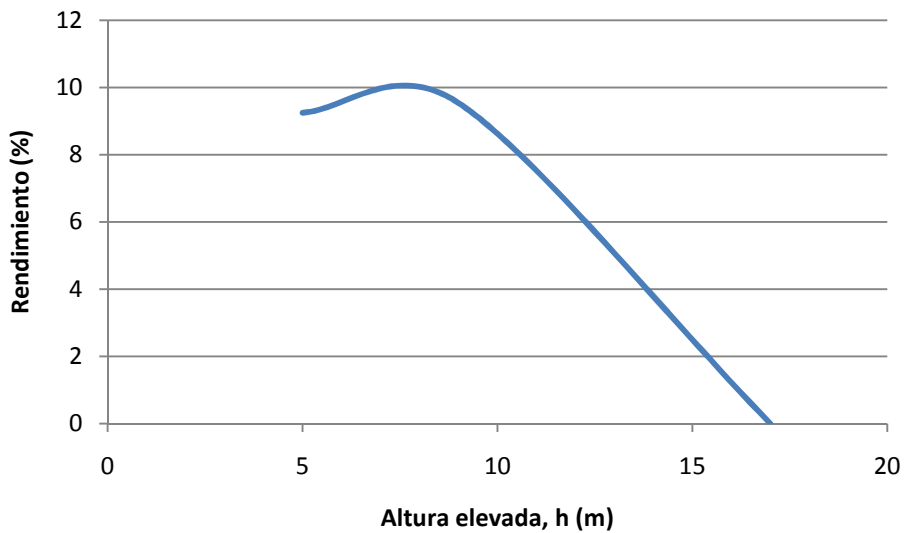


Figura 4.3. Relación de la altura bombeada o elevada con el rendimiento de la bomba de ariete [Fuente: Propia]

4.2.2 Resultado teórico: Análisis teórico del golpe de ariete

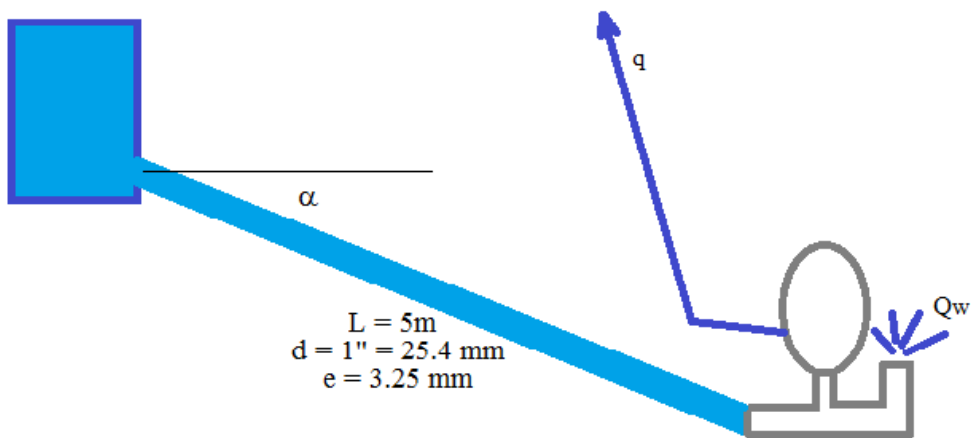


Figura 4.1. Esquema de las condiciones dadas en la caracterización hidráulica [Fuente: Propia]

Para calcular estos datos, deberemos saber el caudal que circula por la tubería

y para ello se debe conocer q y Q_w , por lo que tomaremos el caso en el que el agua es elevada 9 metros de altura, aunque se podría elegir perfectamente el anterior dato, cuando es elevada a 5 metros, quedando:

$$Q_w: 8 \text{ litros en } 30 \text{ s.} = 16 \text{ litros/min}$$

$$q: 0.26 \text{ litros en } 30 \text{ s.} = 0.52 \text{ litros/min}$$

$$Q: 8.26 \text{ litros en } 30 \text{ s.} = 16.52 \text{ litros/min}$$

La sobrepresión producida por el fenómeno conocido como golpe de ariete viene dada por la fórmula de Allievi:

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

$$16.52 \frac{l}{min} \frac{m^3}{10^3 l} \frac{min}{60s} = 2.75 \cdot 10^{-4} m^3/s$$

$$S = \pi r^2 = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \left(\frac{25.4 \cdot 10^{-3}}{2}\right)^2 = 5.07 \cdot 10^{-4} m^2$$

$$c = \frac{1440}{\sqrt{1 + \frac{\epsilon d}{E e}}} = \frac{1440}{\sqrt{1 + \frac{2.74 \cdot 10^9 \cdot 2.54 \cdot 10^{-2}}{200 \cdot 10^9 \cdot 3.25 \cdot 10^{-3}}}}$$

$$c = 1384.98 m/s$$

$$Q = S v \rightarrow v = \frac{Q}{S} = \frac{2.75 \cdot 10^{-4}}{5.07 \cdot 10^{-4}}$$

$$v = 0.54 m/s$$

$$\Delta H = \frac{c v}{g} = \frac{1384.98 \cdot 0.54}{9.81} = 76.23 m$$

Los manómetros durante la caracterización hidráulica marcaban unos 20 - 25 metros columna de agua y la sobrepresión teórica dada por la fórmula de Allievi da como resultado más de 76 metros.

4.2.3 Discusión

A la vista de los resultados experimentales está que el rendimiento de la bomba de ariete y, por lo tanto, el caudal bombeado, ha sido deficiente.

Nuestra misión, ahora, radica en descubrir, al menos, dónde se ha podido cometer algún error que haya implicado estos resultados.

Por ello, valorando y examinando vista atrás el comportamiento de la bomba de ariete y contraponiéndolo a los estudios teóricos, podemos exponer que se han producido los siguientes aspectos que han podido influir en la eficiencia del ariete hidráulico:

Fallo en la válvula de impulso

Observamos durante la caracterización hidráulica que, aunque la válvula de impulso modificada de una válvula no retorno tipo Kent nos funcionó, ésta no cerraba del todo y cuando presuntamente se debía encontrar la válvula cerrada, no lo estaba por completo.

Esta situación provoca que no se produzca tal magnitud teórica de sobrepresión ya que sirve como escape y ésta se disipa más fácilmente.

Además, recordamos como José María Aquilué, propietario de la bomba de ariete de Belsué, nos comentó que si la válvula de impulso no cerraba en algún momento bien, completamente, por cualquier motivo, en su caso, pequeñas obstrucciones con piedrecitas, palitos, etc., el rendimiento caía de forma muy considerable y el agua no llegaba al depósito de descarga.

Cierre lento de la válvula de impulso

Una vez calculada la sobrepresión teórica producida por el fenómeno del golpe de ariete, se procede a calcular el tiempo de cierre crítico de la válvula de impulso para ver si se trata de un cierre rápido o lento.

$$t_c = \frac{2L}{c} = \frac{10}{1384.98} = 7.22 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

Calculado el tiempo crítico, se debe comparar con el tiempo que toma la válvula de impulso en cerrarse completamente y relacionar ambos:

Si:

$$t_c > t_{\text{cierre}} = \text{cierre rápido de la válvula de impulso}$$

$$t_c < t_{\text{cierre}} = \text{cierre lento de la válvula de impulso}$$

Aunque no lo sabemos a ciencia cierta ya que no tenemos la capacidad técnica de medir el tiempo real de cierre de la válvula de impulso, presuponemos, que el tiempo de cierre de la válvula de impulso es mayor al tiempo crítico de cierre.

Por ello, suponemos que $t_{\text{cierre}} > t_c$

Esto tiene una consecuencia inmediata y es que la sobrepresión real producida por el golpe de ariete va a ser menor que la sobrepresión teórica dada por la fórmula de Allievi, como bien hemos podido comprobar durante su funcionamiento.

$$\Delta H_{real} < \Delta H_{Allievi}$$

Pero, ¿cómo se podría solucionar este problema para que el tiempo crítico de cierre fuese mayor que el tiempo real de cierre de la válvula de impulso?

Según la fórmula del tiempo crítico de cierre:

$$t_c = \frac{2L}{c}$$

La celeridad de la onda en la caracterización hidráulica realizada es correcta, de hecho, es elevada, ya que al usar materiales de acero hacen que la misma adquiera un valor alto. Sin embargo, hay otra variable, la longitud de la tubería, que adquiere cierto protagonismo, ya que si esta se aumenta, el valor del tiempo crítico de cierre de la válvula de impulso aumentaría.

Baja sobrepresión producida en el cuerpo del ariete

La sobrepresión producida en el cuerpo de la bomba de ariete viene dada por la fórmula vista anteriormente:

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

Observando la fórmula, se puede deducir fácilmente que la sobrepresión producida depende de dos variables fundamentales, ya que la gravedad es un valor constante y será siempre, para todos los casos, el mismo.

Depende, pues, fundamentalmente, de la celeridad de la onda y de la velocidad. En nuestro caso y como hemos dicho anteriormente, estamos conformes con la celeridad producida durante la caracterización hidráulica, por lo que el factor discordante será la velocidad del agua en la tubería y en el cuerpo del ariete.

El valor de la velocidad del fluido en la tubería de impulso lo consideramos baja. Puede ocurrir por varios motivos, aunque creemos que puede ser consecuencia de que la válvula, cuando se encuentra abierta, no deje escapar todo el agua que debiera salir por lo que evita en cierta medida la aceleración de la misma en la tubería; o bien, porque el tiempo de apertura de la válvula de impulso sea bajo, situación que viene determinada por el peso de la última y por la carrera que tenga para desplazarse sobre el vástago.

Bomba de ariete casera

Además de los anteriores errores o comportamientos no deseados, es de recordar que se trata de una bomba de ariete construida con piezas roscadas de fontanería, cuyo uso comercial no está destinado a la construcción de arietes hidráulicos, ni son fáciles de modificar, como se ha observado en el

caso de las válvulas de impulso, siendo fabricadas para un uso concreto, por lo que el rendimiento que podemos esperar no se podría, en principio, comparar con el de un ariete hidráulico comercial.

5 - APLICACIÓN DE UNA BOMBA DE ARIETE A UNA FINCA AGRÍCOLA

5.1 Consideraciones previas

Ya desde que se comenzó el presente Proyecto Final de Carrera, se tuvo muy en cuenta que sería de gran interés realizar un pequeño caso práctico en el que se mostrara, al menos, un lugar, cercano a la ciudad de Huesca, que cumpliera con los requisitos para la instalación de una bomba de ariete.

Los alrededores de la ciudad de Huesca presentan un relieve semi-montañoso, en el que hay posibilidades reales, sobretodo más hacia el norte de la Provincia, de instalación de arietes hidráulicos, por lo que no fue difícil encontrar un sitio adecuado para ello.



Figura 5.1. Lugar donde se pretende realizar el caso práctico, en el término municipal de Igríes
[Fuente: Propia]

Este caso práctico va a ser ficticio, lo que implica que la bomba de ariete no va a ser instalada en dicho lugar, ni se va a probar en esas circunstancias. Para la realización de la aplicación nos basaremos en datos técnicos suministrados por empresas comerciales de arietes hidráulicos y de bombas convencionales de combustible fósil.

Con unas condiciones existentes, en las que realmente existe un *salto* de agua y una parcela a mayor cota que el punto de alimentación, y la cual no es regada mediante ninguna otra técnica, siendo catalogada como de secano, se va a usar la bomba de ariete para suministrar el agua a la misma.

Posteriormente, se realizará un estudio comparativo respecto al riego de la misma parcela, desde la misma fuente de suministro por una bomba convencional.

La realidad de la parcela muestra que actualmente se encuentra sembrada de un cereal, sin embargo, se va a modificar este aspecto, suponiendo que en la misma hay plantados almendros. El objetivo de esta variación no es otro que la de cambiar el sistema de riego futuro a uno de riego localizado, como consecuencia del ahorro que conlleva este régimen frente al riego por gravedad o aspersión.

Además, de ser regados dichos almendros por un sistema de riego por goteo, como se ha comentado anteriormente, se recurre a la técnica de riego deficitario controlado.

Regar de forma controlada y deficitaria significa que en vez de aplicar las necesidades hídricas totales, se aplican dosis de agua más bajas, o bien, las adecuadas en determinados estados fenológicos de la planta. Así, estudios realizados establecen, que aunque la producción disminuya, no es directamente proporcional a la cantidad de agua ahorrada.

Para este estudio de aplicación, se va a suponer que se necesitan, al menos, usando esta técnica, unos 1000 m³ de agua por hectárea y año para obtener una cosecha aceptable en función del agua aportada.

5.2 Localización del lugar a instalar

El lugar que hemos escogido para la instalación de la bomba de ariete, se encuentra situado en la Provincia de Huesca, y más concretamente, en la Comarca de La Hoya de Huesca.



Figura 5.2. Mapa de la Provincia de Huesca y sus comarcas
[Fuente: <http://www.lascasasrurales.com>, revisada en Abril de 2013]

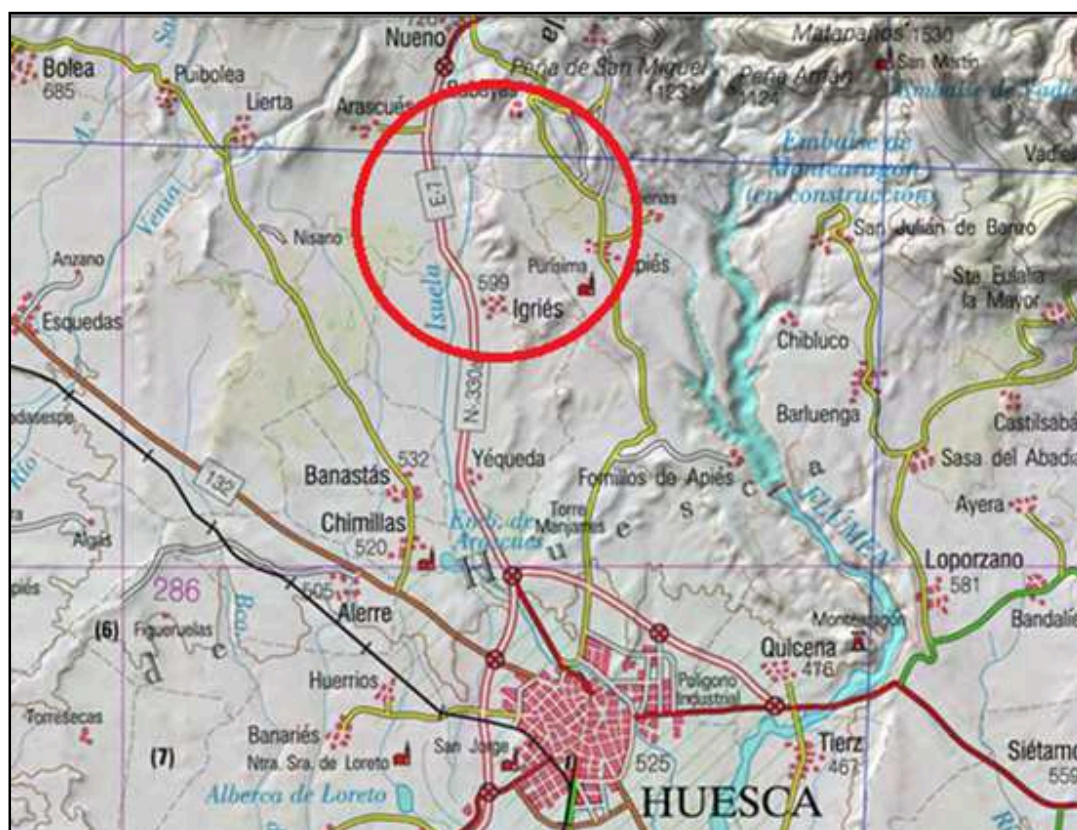


Figura 5.3. Mapa de la zona norte de La Hoya de Huesca
[Fuente: SIGPAC]

Saliendo de la ciudad de Huesca y siguiendo la carretera nacional N-330 en sentido ascendente, hacia el municipio de Nueno, nos encontramos con el pueblo de Yéqueda y posteriormente con Igríes, a la derecha de la carretera.

Se sigue circulando por la carretera nacional N-330 en el mismo sentido, llegando a un punto en el que nos tropezamos, a la izquierda de la misma, con unas granjas de cerdos.

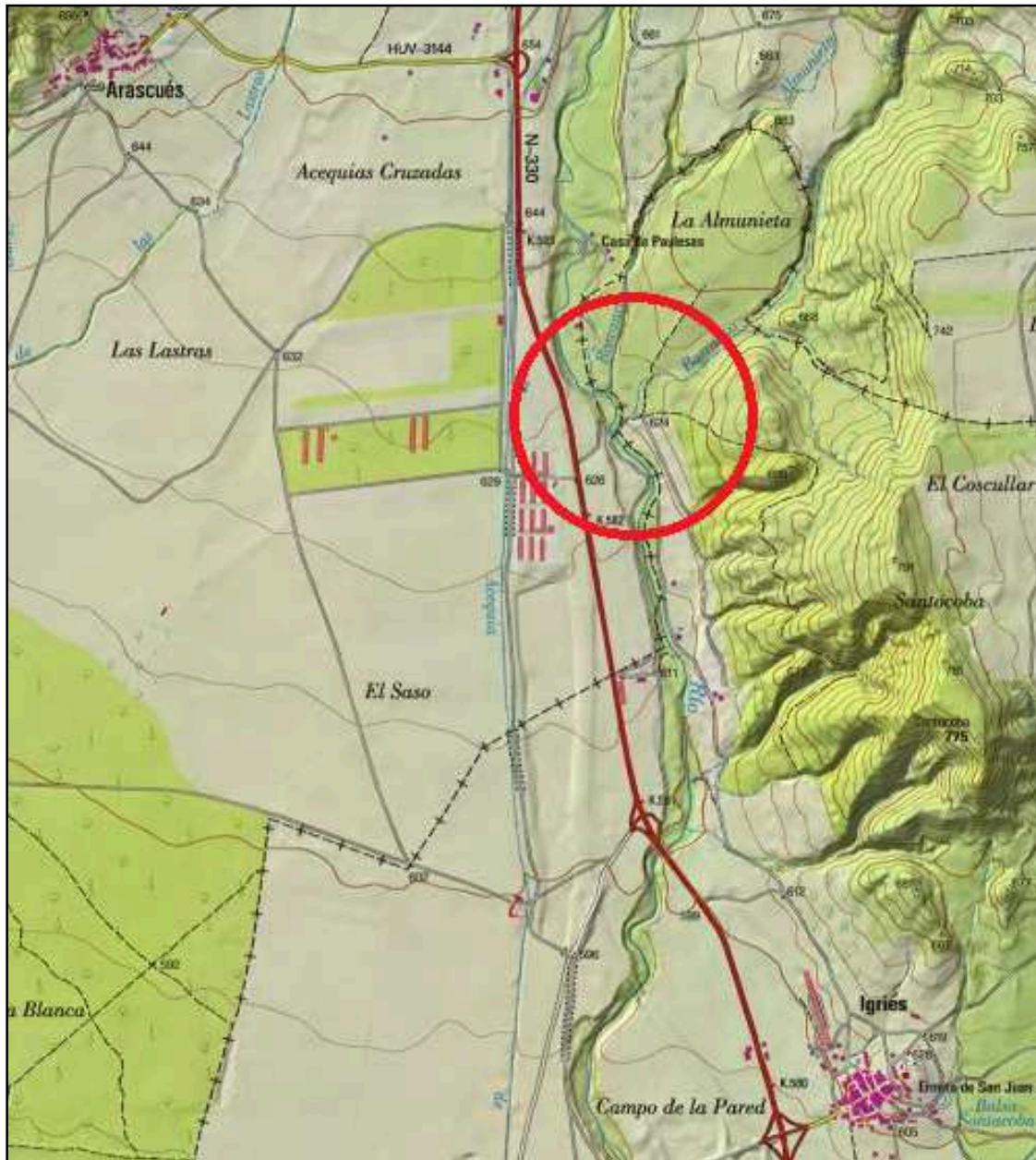


Figura 5.4. La Almuniera. Paraje donde se va a realizar el estudio de aplicación de la bomba de ariete

[Fuente: SIGPAC]

Continuando unos metros más en la misma dirección y sentido, más adelante, y antes de que la carretera supere la autovía Mudéjar (Zaragoza-Huesca), A-23, para transcurrir al otro lado de la misma, se puede observar desde el lado

derecho de la carretera, el lugar fotografiado en la Figura 5.1.



Figura 5.5. Vista aérea de La Almunieta
[Fuente: SIGPAC]

5.2.1 Suministro de agua para la instalación

La fuente encontrada para que sirva de suministro de agua a las bombas de ariete es una acequia que sale del río Isuela, aguas arriba, a la altura de las Casas de las Paulesas. Al llegar a un determinado punto, el señalado en la imagen superior entre una circunferencia roja, la acequia pasa, sobre un puente, por encima del río para regar la otra margen del mismo.

Ese es el lugar a aprovechar como punto de alimentación, debido a que el puente sobre el que pasa la acequia tiene una altura de más de 5 metros, llegando incluso a los 6 metros. Una altura más que aceptable para impulsar un caudal elevado de agua a una cota mayor.

Además, existe otro aspecto fundamental a la hora de elegir este lugar para el estudio de aplicación de la bomba de ariete, y es el que al transcurrir bajo la acequia el río Isuela, el agua derramada durante el funcionamiento del hydram será devuelta a su origen, ya que de no darse esta situación, no es recomendable el uso de este sistema de bombeo como consecuencia de la gran cantidad de agua que escapa por la válvula de impulso.

Por ello, gracias a que el agua derramada va a ser devuelta al río, podemos decir que el lugar elegido es en principio idóneo ya que el agua es tomada unos metros antes del mismo cauce, y va a ser devuelta, aguas abajo, la no bombeada, lo que permitirá su uso más adelante.



Figura 5.6. Lugar escogido para el estudio de aplicación
[Fuente: Propia]

Cumpliendo las condiciones fijadas en el capítulo anterior para la elección del lugar de suministro, únicamente se verá limitado el bombeo de agua mediante este método por la capacidad hidráulica de la acequia, entendiéndose que deben ser abastecidos los arietes hidráulicos instalados al mismo tiempo, por lo que será imprescindible que el caudal que pasa por la acequia, y pueda ser utilizado, sea mayor al requerido para el funcionamiento de las bombas de ariete.

5.2.2 Lugar de descarga

El lugar de descarga será una balsa de agua, donde se bombeará el agua para el riego de la parcela agrícola, debiendo estar situada en el punto más alto de la misma con el fin de que luego pueda ser regada por gravedad.

En el paraje de La Almunieta, lugar donde se procede a realizar el estudio práctico de aplicación, existen varias opciones donde se puede elevar el agua,

y que parecen interesantes de observar y de ilustrar en el presente documento.

Si se presta atención a la vista aérea siguiente, proporcionada por el visor SIGPAC, se puede apreciar la existencia de dos parcelas, a distinta cota y de distinta superficie.



Figura 5.7. Parcelas, 1 y 2, para el bombeo de agua desde el punto de suministro
[Fuente: Propia]

La circunferencia roja sigue mostrando la fuente de suministro desde donde se va a impulsar el agua a las balsas de descarga, representadas en la anterior figura mediante círculos azules.

Se considera de interés observar la diferencia entre optar por el riego de la Parcela 1 o por el riego de la Parcela 2.

La Parcela 2 tiene más extensión por lo que existiría más superficie de riego, pero, además, la cota máxima también es mayor, por lo que el consumo de agua va a dispararse como consecuencia de los dos aspectos anteriores. Esta consecuencia también tiene un apunte reseñable y es que mayor cantidad de agua necesitará la instalación para cubrir las necesidades de riego de la Parcela 2, por lo que será necesario guardar atención al caudal de suministro de la acequia para comprobar que es suficiente

Por otro lado, la Parcela 1 se encuentra a menor cota y con una superficie más pequeña, lo que hace suponer que la cantidad de agua empleada será menor, proporcionalmente hablando.

5.3 Cálculo teórico

Una vez explicadas las consideraciones previas sobre el estudio de aplicación de la bomba de ariete en una finca agrícola y habiendo observado las posibilidades de bombeo que existen, o que hemos tomado en cuenta, se procede a calcular, de forma estimativa, en este capítulo, el caudal que sería elevado usando este sistema de bombeo en las condiciones descritas.

Para ello, hay que tomar unos valores técnicos de la bomba de ariete a instalar, los cuales deben ser facilitados por el fabricante o la empresa comercializadora, y aplicarlos a las condiciones del medio definidas. De este modo, en el presente estudio de aplicación se ha optado, por escoger un ariete comercial, de la empresa Blake Hydram, del que se poseen esos datos, por ser una empresa de localización relativamente cercana a donde nos encontramos.

Normalmente, cada una de las empresas, realiza una caracterización hidráulica propia de sus bombas de ariete facilitando una serie de tablas a sus clientes con sus características técnicas. Siendo muy común que ofrezcan una tabla en la cual se muestra la relación entre las distintas alturas de trabajo y el caudal descargado en 24 horas por litro y minuto de agua suministrada.

Working Fall (metres)	Vertical height to which water is raised above the Hydram (metres)											
	5	7.5	10	15	20	30	40	50	60	80	100	125
1	144	77	65	33	29	19.5	12.5					
1.5		135	96.5	70	54	36	19	15				
2		220	156	105	79	53	33	25	19.5	12.5		
2.5		280	200	125	100	66	40.5	32.5	24	15.5		
3			260	180	130	87	65	51	40	27	17.5	12
3.5				215	150	100	75	60	46	31.5	20	14
4				255	173	115	86	69	53	36	23	16
5				310	236	155	118	94	71.5	50	36	23
6					282	185	140	112	93.5	64.5	47.5	34.5
7						216	163	130	109	82	60	48
8							187	149	125	94	69	55
9							212	168	140	105	84	62
10	Litres pumped in 24 hours per litre/min of drive water						245	187	156	117	93	69
12							295	225	187	140	113	83
14							265	218	167	132	97	
16								250	187	150	110	
18								280	210	169	124	
20									237	188	140	

Tabla 5.1. Litros bombeados en 24 horas suministrando un caudal de 1 litro por minuto en un ariete hidráulico de la empresa Blake Hydram

[Fuente: <http://www.allspeeds.co.uk>, revisada en Abril de 2013]

Según la anterior tabla, y dado el supuesto de que se quiera bombear agua a 20 metros de altura, lugar donde se encontrará el depósito de descarga, y asumiendo una altura de caída de 2.5 metros, corresponderá, según el fabricante, un caudal de 100 litros bombeados en 24 horas si discurre un litro por minuto durante la impulsión.

Una vez se conoce el valor precedente, corresponde conocer cuál va a ser el tamaño de la bomba de ariete debido a que el caudal de suministro va a depender del mismo, siendo mayor dicho valor cuanto mayor sea su dimensión. De esta manera, en la tabla siguiente se ofrece, a cada tamaño de bomba de ariete, un intervalo del posible caudal de suministro, para así conocer el caudal que va a ser bombeado hasta el depósito de descarga a una altura dada y con una bomba de ariete determinada elegida.

Size of Hydram			1	2	3	3.5	4	5	6	7	8	10
Input capacity of Hydram	litre per minute	min	7	12	27	45	68	136	180	364	545	770
		max	16	25	55	96	137	270	410	750	1136	1545
Max. height to which the Hydram will pump	metres		150	150	120	120	120	105	105	105	105	105
Nominal diameter of the drive pipe	m.m. bore		32	40	50	65	80	100	125	150	175	200

Tabla 5.2. Relación de los caudales de suministro con el tamaño de la bomba de ariete para los arietes hidráulicos de la empresa Blake Hydram.

[Fuente: <http://www.allspeeds.co.uk>, revisada en Abril de 2013]

Por ello, y según la tabla anterior, si se elige una bomba para el abastecimiento de la balsa de descarga de 3", van a circular a través de la tubería de impulso, de 50 mm. de diámetro, un rango de 27 a 55 litros por minuto de agua.

Como el intervalo ofrecido, de 27 a 55 litros por minuto, es muy amplio, es conveniente tomar un valor medio que será: 41 litros por minuto.

De esta forma, conociendo el caudal bombeado durante 24 horas si el caudal suministrado es de un litro por minuto y el caudal suministrado durante un minuto en función de la bomba escogida, se puede estimar tanto el caudal por segundo elevado para esas condiciones como el caudal bombeado por año.

$$\begin{array}{l}
 1 \text{ l suministrado}/\text{min} \longrightarrow 100 \text{ l}/24\text{h} \\
 41 \text{ l suministrado}/\text{min} \longrightarrow x \text{ l}/24\text{h} \\
 x = 4100 \text{ l}/24 \text{ h}
 \end{array}$$

Según los datos facilitados por la empresa Blake Hydram y realizando los cálculos como establece, una bomba de ariete de 3", bombearía, en las condiciones establecidas, aproximadamente 4100 litros en 24 horas de funcionamiento, es decir, unos 47 ml cada segundo.

5.3.1 Cálculo teórico para la Parcela 1

Siguiendo las pautas del anterior supuesto explicado, se va a elegir, a continuación, tanto el tamaño como el número de bombas de ariete que se deben instalar para, en las condiciones dadas, cumplir con el caudal necesario para el riego de los almendros mediante la técnica de riego deficitario controlado.

Características de la Parcela 1:

Cota máxima: balsa de descarga: 630 m.s.n.m.

Superficie: 2.68 ha.

Caudal necesario: 2680 m³/año.

Cota del punto de suministro: 615 m.s.n.m.

Cota de la bomba de ariete: 609 m.s.n.m.

La caída de trabajo, o altura de suministro, son 6 metros, y la de elevación, 20 metros, así, y según se muestra en la tabla 5.1, corresponde un caudal de 282 litros en 24 horas por litro de agua suministrado por minuto.

Haciendo pruebas con distintos tamaños de bombas de ariete y considerando que es preferible instalar varios arietes en paralelo en vez de uno solo grande, como bien apunta Jeffery *et al.* (1992), se decide instalar una bomba de ariete de 2" y otra de 1".

En los cálculos siguientes, durante el estudio de aplicación de la bomba de ariete se va a aplicar un factor del 90% como el tiempo que va a encontrarse en funcionamiento el ariete hidráulico, considerando que pueden existir momentos en los que por mantenimiento o por filtración de ciertos elementos en la conducción, pueda pararse la bomba.

Con la bomba de ariete de 1":

Caudal de suministro medio por minuto: 11.5

$$\begin{array}{l} 1 \text{ l suministrado/min} \longrightarrow 282 \text{ l/24h} \\ 11.5 \text{ l suministrado/min} \longrightarrow x \text{ l/24h} \end{array}$$

$$x = 3243 \text{ l/24 h}$$

$$3243 \text{ l/24h} \cdot 0.90 = 2918.7 \text{ l/24h}$$

$$2918.7 \frac{\text{l}}{1 \text{ día}} \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}}$$

$$1065325.5 \text{ l/año} = 1065 \text{ m}^3/\text{año}$$

Con la bomba de ariete de 2":

Caudal de suministro medio por minuto: 18.5

$$\begin{array}{l} 1 \text{ l suministrado/min} \longrightarrow 282 \text{ l/24h} \\ 18.5 \text{ l suministrado/min} \longrightarrow x \text{ l/24h} \end{array}$$

$$x = 5217 \text{ l/24 h}$$

$$5217 \text{ l/24h} \cdot 0.90 = 4695.3 \text{ l/24h}$$

$$4695.3 \frac{\text{l}}{1 \text{ día}} \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}}$$

$$1713784.5 \text{ l/año} = 1713 \text{ m}^3/\text{año}$$

Caudal suministrado por año con las dos bombas de ariete en la Parcela 1 con las condiciones iniciales:

$$\text{bomba ariete}_1 + \text{bomba ariete}_2 = 1065 \text{ m}^3/\text{año} + 1713 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$\text{caudal total} = 2778 \text{ m}^3/\text{año}$$

La Parcela 1 tiene 2.68 ha. por lo que un caudal de próximo a 2778 m³/año cumple con la proporción de regar mediante riego localizado una hectárea de almendro con 1000 m³/año de agua mediante la técnica de riego deficitario controlado.

5.3.2 Cálculo teórico para la Parcela 2

La Parcela 2, en cambio, tiene una extensión mucho mayor que la anterior Parcela 1, y además, una cota mayor, por lo que acorde a lo que se ha comentado anteriormente, se necesitarán, en proporción, un mayor número de bombas de ariete, y estas a su vez de mayor tamaño para cumplir con las necesidades hídricas de la parcela acordadas.

Características de la Parcela 2:

Cota máxima: balsa de descarga: 653 m.s.n.m.

Superficie: 11.23 ha.

Caudal necesario: 11230 m³/año.

Cota del punto de suministro: 615 m.s.n.m.

Cota de la bomba de ariete: 609 m.s.n.m.

La altura de impulso de la instalación sigue siendo la misma, 6 metros aproximadamente, sin embargo, la diferencia de cotas cambia a 44 metros. No obstante y como no corresponde ningún valor para una altura de elevación de 44 metros respecto a la bomba de ariete, y por tratarse de un valor orientativo, se va a realizar la media entre el valor de la altura de 40 y el de 50 para estimar el caudal elevado en 24 horas con un litro por minuto de suministro a la altura de 44 metros. Dicho valor es: 126.

Como el valor del caudal calculado es pequeño, como consecuencia de la diferencia de cotas de desnivel, el caudal elevado con un único ariete será pequeño por lo que será conveniente elegir bombas de ariete de mayor diámetro.

Con una bomba de ariete de 3.5”:

Caudal de suministro medio por minuto: 70.5

$$\begin{array}{l} 1 \text{ l suministrado/min} \longrightarrow 126 \text{ l/24h} \\ 70.5 \text{ l suministrado/min} \longrightarrow x \text{ l/24h} \end{array}$$

$$x = 8883 \text{ l/24 h}$$

$$8883 \text{ l/24h} \cdot 0.90 = 7994.7 \text{ l/24h}$$

$$7994.7 \frac{\text{l}}{1 \text{ día}} \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}}$$

$$2918065.5 \text{ l/año} = 2918 \text{ m}^3/\text{año}$$

Si una bomba de ariete de 3.5” consigue elevar del orden de 2918 m³/año, y necesitamos descargar un mínimo de 11230 m³/año para cumplir la relación marcada en las necesidades hídricas para regar los almendros con la técnica de riego deficitario controlado, se necesitarán:

$$\frac{11230 \text{ m}^3/\text{año}}{2918 \text{ m}^3/\text{año}} = 3.85$$

Por ello, según los datos facilitados y las condiciones dadas, para ser capaces de suministrar el caudal requerido a la Parcela 2, se necesitan 4 bombas de ariete, de 3.5" cada una, dispuestas en disposición paralela.

5.4 Estudio comparativo con una bomba convencional

Estudiado el número de bombas de ariete y el tamaño del que deben ser para abastecer de agua las parcelas descritas anteriormente, se considera de interés el realizar un estudio general orientativo entre una bomba de ariete y otra convencional, de gasolina, para abastecer la Parcela 2, la cual normalmente sería la empleada para bombear el agua al depósito de descarga, situado en la cota más alta de la parcela.

Se recuerdan las condiciones dadas para la Parcela 2:

Cota máxima: balsa de descarga: 653 m.s.n.m.

Superficie: 11.23 ha.

Caudal necesario: 11230 m³/año.

Cota del punto de suministro: 615 m.s.n.m.

5.4.1 Selección de la bomba convencional












Teniendo en cuenta los anteriores datos facilitados y observando que la diferencia de cotas entre el punto de suministro, la acequia, y la balsa de descarga es de aproximadamente 40 metros, se ha seleccionado como bomba convencional una motobomba de gasolina de 4 tiempos de la marca Mitsubishi, modelo SERM 50-V.



Figura 5.7. Motobomba Mitsubishi modelo SERM 50-V
[Fuente: <http://www.campeon.es>, revisada en Abril de 2013]

Esta bomba, al igual que los arietes hidráulicos, posee una serie de tablas, suministradas por el fabricante. Por un lado, las características técnicas de la

motobomba; y por el otro, una relación del caudal entregado, expresado en litros por minuto, en función de la altura de descarga.

Modelo Modèle	SERM-50V
Código Code	8467
Motor Moteur Ciclo cycle	MITSUBISHI GM182 4 tiempos 4 temps High-Revolution
 cm ³	181
 CV	6
 máx (l/h)	30.000
 máx (m)	90
ASP. máx (m)	8
 GAS	2" + 2 x 1"
 mm	50 + 2 x 25
 (h)	2
LWA dB(A)	109
 mm	565x460x483
 Kg	34
	✓
	✓
P.V.P.	989,90

Altura manométrica Hauteur manométrique	(m)	SERM-50V
	10	27.000
20	23.400	
30	19.200	
40	15.600	
50	12.000	
60	8.400	
70	5.700	
80	2.700	

Tabla 5.3 y 5.4. Características técnicas de la motobomba y relación entre el caudal entregado y la altura manométrica.

[Fuente: <http://www.campeon.es>, revisada en Abril de 2013]

5.4.2 Cálculo teórico

Según la tabla anterior, en la que se relaciona el caudal entregado y la altura manométrica, el fabricante establece que, aproximadamente, para una diferencia de cotas de 40 metros de altura, se bombean en torno a 15600 litros por hora de funcionamiento de la bomba seleccionada.

$$\Delta cota = 40 \text{ m} \longrightarrow 15600 \text{ l/hora}$$

Conocidos los litros por hora que eleva la bomba convencional a la balsa de descarga, se debe estimar el tiempo, en horas, que toma la misma en bombear el caudal requerido.

$$\frac{11230 \text{ m}^3/\text{año}}{15.6 \text{ m}^3/\text{hora}} = 719.87 \text{ horas/año}$$

El caudal bombeado cumple perfectamente con el caudal requerido ya que un año posee muchas más horas que las que le cuesta a la motobomba elevar el agua a la Parcela 2, sin embargo, para el estudio comparativo entre los dos sistemas de bombeo interesa saber cuántas horas le lleva porque el consumo de gasolina que conlleva no es indiferente tratándose de un valor o de otro.

Por ello, a falta del conocimiento fehaciente del consumo de gasolina que requiere la bomba Mitsubishi, modelo SERV 50-V, se establece una relación entre el concepto de potencia y el consumo de gasolina.

$$potencia = \frac{trabajo}{tiempo}$$

$$6 \text{ CV} \longrightarrow 4410 \text{ w} = 4410 \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

Un litro de gasolina proporciona al arder 34.78 megajulios:

$$1 \text{ l}_{gasolina} \longrightarrow 34.78 \cdot 10^6 \text{ J}$$

$$\frac{34.78 \cdot 10^6 \text{ J}}{4410 \frac{\text{J}}{\text{s}}} = 7886 \text{ s/l}_{gasolina}$$

$$7886 \text{ s} \cong 2.19 \text{ horas/l}_{gasolina}$$

Un litro de gasolina proporciona, pues, energía durante 2.19 horas.

$$\frac{719.87 \text{ horas/año}}{2.19 \text{ horas/l}_{gasolina}} = 328.71 \text{ l}_{gasolina}/\text{año}$$

Considerando, que a día 30 de Abril de 2013, un litro de gasolina sin plomo 95, cuesta 1.488 €/litro:

$$328.71 \text{ l}_{gasolina}/\text{año} \cdot 1.488 \text{ €/l}_{gasolina} = 489.12 \text{ €/año}$$

5.4.3 Bomba de ariete vs bomba de gasolina

Según los datos obtenidos a través de las tablas ofrecidas por los fabricantes y las condiciones de la Parcela 2, se puede establecer que para elevar el caudal necesario para el riego de almendros mediante la técnica de riego deficitario controlado, se necesita, o bien, 4 bombas de ariete Blake de 3.5" cada una o una bomba Mitsubishi, modelo SERV 50-V, trabajando casi 720 horas al año.

Bomba de ariete Blake de 3.5":

Para el presente estudio comparativo entre una bomba de ariete y una bomba convencional de gasolina no se ha podido conocer el precio actual de la bomba. Sin embargo, un estudio de Jeffery (1991), en el que hace una comparativa entre los arietes hidráulicos DTU y los comerciales, establece un precio, que será el que fijaremos en el presente documento, a falta de no tener otro con el que trabajar.

La bomba de ariete de 3.5" Blake, en dicho trabajo realizado por Jeffery (1991), establece que el ariete hidráulico tiene un precio de 1500 \$ (1145.88 €).

Estimando que el mantenimiento del ariete hidráulico es mínimo, se va a establecer un porcentaje de un 1% del valor inicial para compensar esta serie de gastos.

Bomba convencional Mitsubishi, modelo SERV-50:

Este modelo de motobomba cuesta, según el fabricante consultado, 989.90 €.

Al igual que en el caso anterior, se va a establecer un porcentaje de un 3% del coste inicial en el mantenimiento de la misma.

Además, a los costes iniciales, se le deben sumar, cada año, el saldo invertido en gasolina para hacer funcionar la motobomba, que asciende a 489.12€.

Con estos datos estudiados encima de la mesa, se puede establecer una relación entre ambos sistemas de bombeo y observar lo que ocurre.

Al inicio, la inversión es considerablemente más elevada, en torno a casi tres veces más, en una instalación con bomba de ariete que en una instalación con bomba convencional, como consecuencia del elevado coste de las bombas de ariete en sí.

Sin embargo, Jeffery (1991), asegura en su trabajo que se puede disminuir el coste inicial si se utiliza una bomba DTU. Este tipo de bombas de ariete, como explicamos en apartados anteriores, diseñadas por una serie de investigadores

desarrollaron un prototipo que según ese mismo trabajo no tiene nada que envidiar a los arietes hidráulicos comerciales. La razón por la que es mucho más económico es que teniendo un taller adecuado, mínimamente equipado, lo puede construir uno mismo, con lo que disminuye de forma notoria el precio inicial, asegurando Jeffery (1991) que se han construido bombas de ariete DTU con 450 \$.

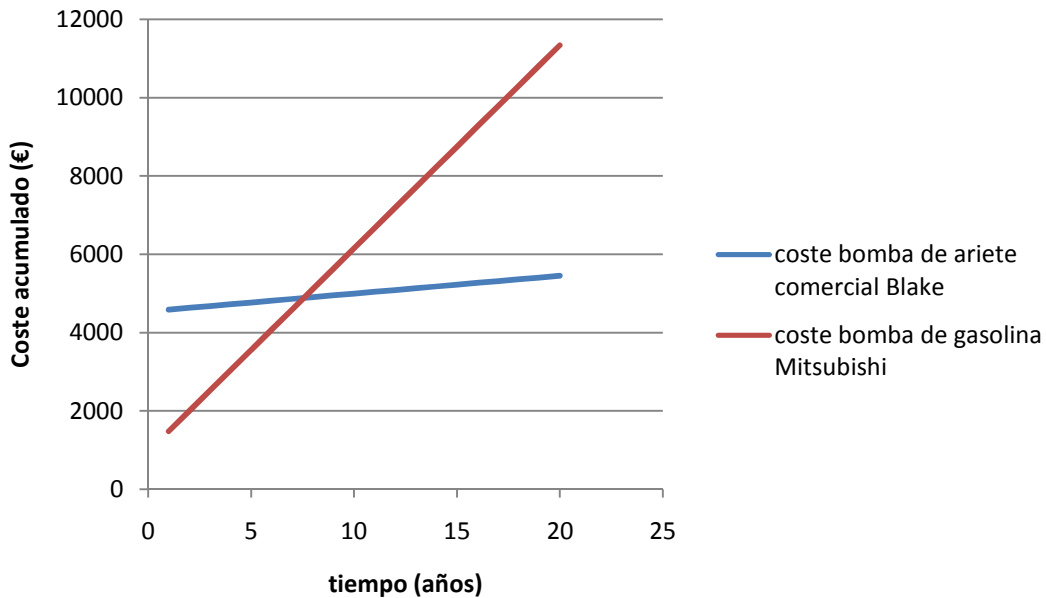


Figura 5.8. Tendencia del coste acumulado entre una bomba de ariete comercial Blake y una motobomba de gasolina Mitsubishi.
[Fuente: Propia]

Sin embargo, aunque en un principio el coste de la instalación es indudablemente mayor, conforme pasan los años se observa como la bomba de ariete que posee un mantenimiento cuasi-mínimo tiene una recta prácticamente horizontal, mientras que la bomba de gasolina, como consecuencia del precio de los combustibles, va elevando su coste acumulado poco a poco, hasta incluso, llegar a doblar el precio de coste de la bomba de ariete, como bien se puede observar en la gráfica anterior.

6 - CONCLUSIONES

Después del trabajo invertido en el presente documento podemos establecer las siguientes conclusiones:

- La bomba de ariete es un sistema de impulsión aparentemente sencillo pero que cierra tras él multitud de pequeños aspectos que influyen de manera muy determinante en el rendimiento de la misma.
- Se debe profundizar más en el estudio teórico del ciclo de la bomba de ariete, ya que existen multitud de modelos que describen el funcionamiento pero no hay unanimidad a la hora de decantarse por uno de ellos.
- Es muy difícil construir una válvula de impulso modificando una válvula no retorno y que esta funcione adecuadamente, por ello, si la altura de trabajo no es muy elevada es recomendable usar una válvula no retorno tipo clapeta como válvula de impulso.
- A pesar del mal resultado obtenido en la caracterización hidráulica de la bomba de ariete construida, el balance ha sido positivo porque hemos podido aprender de los errores cometidos.
- Sorprende de forma positiva, una vez que la bomba de ariete lleva un ritmo constante, su uniformidad durante el ciclo y su constancia.
- En lugares donde las condiciones sean las adecuadas, así como el caudal de suministro suficiente para su funcionamiento, es interesante estudiar la bomba de ariete como una opción más.

BIBLIOGRAFÍA

Acitores Martínez, F. J. (2012) Estudio teórico y experimental de la bomba de ariete. Directores: Pablo Martínez-Legazpi Aguiló y Ulpiano Ruiz-Rivas Hernando. Proyecto Final de Carrera. Escuela Politécnica Superior. Universidad Carlos III de Madrid. España.

Afif Khouri, E. (2004) *Apuntes de Hidráulica para explotaciones forestales*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo.

Agencia de Cooperación Internacional del Japón (2012) *Estudio de Promoción y Difusión de Buenas Prácticas "Bomba de Ariete" del Proyecto Tawan Ingnika*.

Arviza Valverde, J., Balbastre Peralta, I. y González Altozano, P. (2002) *Ingeniería Rural: Hidráulica*. Ediciones de la Universidad Politécnica de Valencia.

Awoke Tessema, A. (2000) *Hydraulic Ram Pump System Design and Application*.

Azoury, P. H. (1992) *Engineering Applications of Unsteady Fluid Flow*. Wiley Editorial.

Benavides Muñoz, H. (2008) *Descripción y efectos del golpe de ariete. Protección de líneas hidráulicas*. Apuntes de la asignatura *Hidráulica de tuberías*. Universidad Técnica Particular de Loja. Ecuador.

Bustamante Ojeda, A. y Quezada Chuncho, M. E. (2009) *Estudio de los parámetros de funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico multimpulsor A&M 1.0*. Director: Fran Reinoso Avecillas. Proyecto Final de Carrera. Facultad de Ingenierías. Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador.

Cahyanta, Y. A. y Mandagi, A. W. (2011) *The Effect of Waste Valve Stroke Length on the Hydraulic Ram Performance*. International Journal of Engineering and Science Vol. 2, No. 4.

Campaña Calero, C. N. y Guamán Alarcón, D. A. (2011) *Construcción y diseño de una bomba de ariete hidráulico*. Director: Orwield Guerrero. Proyecto Final de Carrera. Facultad de Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Nacional. Ecuador.

Castellanos Rojas, W. G. (2007) *Manual para el desarrollo del laboratorio de maquinas hidráulicas de la carrera de Ingeniería Mecánica*. Director: José Ismael Véliz Padilla. Proyecto Final de Carrera. Facultad de Ingenierías. Universidad San Carlos de Guatemala. Guatemala.

Chi, M. (2002) *Hydraulic Ram Handbook. A guide for policy makers, technicians*

and users based on experiences made in the R. P. of China. Bremen Overseas Research and Development Association. China.

Cooperative Extension Service (1998) *Hydraulic Rams for off-stream livestock watering*. University of Georgia. Estados Unidos.

Cooperative Extension Service (1998) *Hydraulic Rams for standard plumbing parts*. University of Georgia. Estados Unidos

De Jong, P. (1988) *Hydraulic Rams: Consumers guide*. Delft University of Technology. Centre for International Cooperation and Appropriate Technology. Holanda.

Development Technology Unit (1996) *New developments in Hydraulic Ram Pumping*. Technical Release no. 13. University of Warwick. Reino Unido.

Dugan, W. G. y Lansford, W. M. (1941) An analytical and experimental study of the Hidraulic Ram. *Bulletin Vol. 38, nº 22*. University of Illinois. Estados Unidos.

Espinosa Gómez, M. J. y Villota Chicaiza, D. E. (2011) *Planificación y Diseño de un sistema hidráulico para el abastecimiento de agua en el Barrio San Miguel de Paquiestancia del Cantón Cayembe ubicado a 3200 msnm*. Director: Fernando Jácome Jijón. Proyecto Final de Carrera. Facultad de Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Nacional. Ecuador.

Filipan, V., Virag, Z. y Bergant, A. (2003) *Mathematical Modelling of a Hydraulic Ram Pump System*. Journal of Mechanical Engineering Vol. 49, nº 3, pp. 137-149.

Hasluck, P. N. (1913) *Pumps and Hydraulic Rams, with numerous engravings and diagrams*. Cassel & Company Limited.

Hazarika, S. (2007) *Theory and application of hydraulic ram pumps (hydrams)*.

Inversin, A. R. (1999) *The construction of a Hydraulic Ram Pump*. South Pacific Appropriate Technology Foundation.

International Development Research Centre (1986) *Proceedings of a Workshop on Hydraulic Ram Pump (Hydrum) Technology*. Manuscript Report.

Izquierdo Pupo, R. (1992) *Instalación de arietes hidráulicos de alta eficiencia*. *Publicaciones Internas*. Cuba.

Janke, K. y Finger, L. (1994) *Hydraulic Ram Pump*. Home Power 41, p. 74-76.

Jeffery, T. D. (1991) *Comparision Between DTU and Commercial Hydraulic Ram Pump Performance*. Development Technology Unit (DTU). Working Paper no. 33. University of Warwick. Reino Unido.

Jeffery, T. D., Thomas, T. H., Smith, A. V., Glover, P. B. y Fountain, P. D. (1992) *Hydraulic Ram Pumps. A guide to ram pump water supply systems*. Development Technology Unit (DTU). ITDG Publishing.

Jiménez, J. M. *El ariete hidráulico*. Taller de Investigación Alternativa.

Kahangire, P. O. (1984) *An experimental investigation and design of Hydraulic Ram Pumps*. Tesis. Civil Engineering Department. University of Ottawa. Canadá.

Krol, J. (1951) *The Automatic Hydraulic Ram. Its Theory and Design*. Institution of Mechanical Engineering Proceedings, Vol. 165, nº 64, pp. 53-73.

Lee, S. (2000) *Building a homemade ram pump*. Home Power 76, p. 42-48.

Martínez Cañadas, M. A. (1993) *Hidráulica aplicada a proyectos de riego*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Murcia.

Maratos, D. F. (2002) *Technical feasibility of wavepower for seawater desalination using the hidro-ram (Hydram)*. Desalination 153, p.287-293.

Matos, D. (2009) *Diseño para la implementación de bomba hidráulica de ariete "JORC" para uso agrícola en República Dominicana*.

Montecinos Larrosa, A. (2006) *Hacia la cultura solar*. Editorial CubaSolar.

Pérez Farrás, L. E. y Guitelmán, A. (2005) *Estudio de transitorios: Golpe de Ariete*. Cátedra. Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires. Argentina.

Ramón Chamba, L. E. y Vallejo Herrera, D. X. (2005) *Diseño y construcción de un ariete y de una rueda hidráulica para bombeo de agua en la granja experimental San Marcos del HCPP*. Directores: Carlos Naranjo y Hernán Ojeda. Proyecto Final de Carrera. Facultad de Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica del Ejército. Ecuador.

Rife Hydraulic Engine Manufacturing Co (1985) *Manual of information. Hydraulic water Rams*.

Shuaibu Ndache, M. (2007) *Design and Construction of a Hydraulic Ram Pump*. Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, pp. 59-70.

Silver, M. (1977) *Use of Hydraulic Rams in Nepal: A Guide to Manufacturing and Installation*. UNICEF.

Tacke, J. H. P. M. (1988) *Hydraulic Rams: a comparative investigation*. Communications on hydraulic and geotechnical engineering, Report no. 88. Delft University of Technology. Holanda.

Tacke, J. H. P. M. and Verspuy, C. (1989) *Hydraulic Rams*. Faculty of Civil Engineering. Delft University of Technology. Holanda.

Taye, T. (1998) *Hydraulic Ram Pump*. Journal of the ESME, Vol. 2, no. 1.

Thomas, T. H. (1994) *Algebraic Modeling of the Behaviour of Hydraulic Ram-Pumps*. Development Technology Unit (DTU). Working Paper no. 41. University of Warwick. Reino Unido.

U.S. Department of Agriculture. (2007) Hydraulic Ram Pumps. *Technical Notes 26*.

Watt, S. B. (1975) *A manual on the hydraulic ram for pumping water*. Intermediate Technology Publications.

Welch, M. (1991) *Alternative energy engineering's high lifter pump*. Home Power 23, p. 58-60.

Welch, M. (1994) *The Folk Ram Pump*. Home power 40, p.44-47.

Wright Clarke, J. (1900) *Hydraulic Rams: their principles and construction*. D. Van Nostrand Company.

ANEXO I

Procedimiento para la construcción de la bomba de ariete

El prototipo de bomba de ariete construido en el presente Proyecto Final de Carrera está constituido, como bien se explica en el respectivo apartado, por distintas piezas de fontanería que se pueden encontrar fácilmente en cualquier establecimiento.

Materiales que se han utilizado para la construcción de la bomba de ariete:

- Llave de bola de 1”.
- Nipple de 100 mm de acero galvanizado de 1”.
- T de acero galvanizado de 1”.
- 4 manguitos de acero galvanizado de 1”.
- Curva de 90º de acero galvanizado de 1”.
- Válvula no retorno tipo clapeta de 1”.
- Válvula no retorno tipo York de 1” modificada a válvula de impulso.
- T de acero galvanizado 1”-1”-3/4”.
- Reducción de acero galvanizado de 1” a 1/2”.
- Manguito de 1/2” de acero galvanizado.
- Llave de bola de 1/2”.
- Enlace de PE de 1/2”.
- Vaso de expansión de 8 L.
- Además se debe disponer de distintas herramientas para construir el ariete como llaves de distintas medidas, una llave inglesa, una llave grifa, una palanca para poder hacer más fuerza al roscar, teflón, etc.

Una vez obtenidos los materiales y disponiendo de un lugar de trabajo adecuado, amplio y despejado, se puede empezar con la construcción de la bomba de ariete.

Se puede empezar a construir la bomba de ariete por donde se desee, pero en el presente trabajo, se ha preferido empezar a trabajar por la T de acero galvanizado de 1” por ser la pieza central del cuerpo del ariete hidráulico.

A esta pieza, se le irán acoplando todas las demás hasta quedar constituida, al final del proceso, la bomba de ariete.



Figura Al.1. T de acero galvanizado de 1"
[Fuente: Propia]

A la T de acero galvanizado de 1", se le va a roscar un manguito para poder unirlo posteriormente a la curva de 90°. Se debe poner un manguito por ser tanto la T como la curva de 90° piezas hembras.

Es conveniente recordar que todas las piezas aquí descritas, y como se puede observar en las distintas fotografías, están correctamente roscadas y entre ellas se le añade teflón para que no existan posteriormente pérdidas.

Por ello se debe ser generoso a la hora de poner el teflón, siendo cuidadoso a la hora de roscarlo sobre la pieza macho, teniendo en cuenta que debe hacerse en sentido de la rosca, para que posteriormente ambas lo hagan correctamente y no pierda agua la conducción.



Figura Al.2. T de 1" con un manguito roscado
[Fuente: Propia]

Puesto el manguito y cubierto con teflón, se rosca la curva de 90° de acero galvanizado.



Figura A1.3. T junto con la curva de 90°
[Fuente: Propia]

Enroscada la curva y en vez de proseguir colocando la válvula de impulso, se centra el procedimiento al otro lado de la T de 1", debido a que la válvula de impulso es una pieza sensible y delicada por lo que es conveniente roscarla al final del proceso para que al colocar otras piezas de la bomba de ariete no se estropee sin querer.

Se rosca, por ende, el nipple al otro lado de la T, así como la llave de bola a continuación del mismo, que será el primer elemento de la bomba de ariete que atravesará el agua.

Además, en el presente paso, también se aprovecha para roscar dos manguitos adicionales: uno, encima de la T, que conducirá a la válvula de descarga y otro, encima de la curva de 90° que conducirá, a su vez, a la válvula de impulso.



Figura A1.4. Cuerpo del ariete hidráulico
[Fuente: Propia]



Figura Al.5. Cuerpo del ariete hidráulico con la llave
[Fuente: Propia]

Anteriormente, se ha comentado la fragilidad de trabajar con la válvula de impulso, por lo que se continúa la construcción de la bomba de ariete con la válvula de descarga y el manguito correspondiente para acoplar, a continuación, la T reductora de 1" -1" - 3/4".



Figura Al.6. Válvula de descarga instalada sobre el cuerpo de la bomba de ariete
[Fuente: Propia]

La T reductora en un extremo de acero galvanizado 1" -1" - 3/4" es utilizada para la realización de la bomba de ariete porque existen dos caminos y ambos son reducidos.

Uno, el que acude al vaso de expansión, o de la cámara de aire, debe ser reducido, y es justamente el extremo del lado que ponemos la reducción de la T 1" -1" - 3/4", porque tiene ese diámetro de entrada y debe ser acoplado a la misma.

Otro de los caminos que toma la T reductora es la tubería de descarga hasta el depósito elevado. Esta tubería, como se ha apuntado anteriormente, puede ser

de cualquier material y el diámetro es menor al de la tubería de descarga, como consecuencia de que el caudal que atraviesa la misma también es menor.



Figura A1.7. Válvula de descarga con el manguito roscado
[Fuente: Propia]



Figura A1.8. T reductora 1"-1"-3/4" acoplada encima de la válvula de descarga
[Fuente: Propia]

Una vez instalada la T reductora 1"-1"-3/4" se le acopla a la salida de 1" una reducción de 1" a 1/2" para posteriormente adjuntar la llave de 1/2" roscada con la pieza reductora mediante un manguito de acero galvanizado de 1/2".



Figura AI.9. Salida de agua instalada para el bombeo
[Fuente: Propia]

Instalada la salida de agua hacia la tubería de descarga, se acopla, en último lugar, a la llave de bola de 1/2" un acople de PE, también de 1/2", para encajar en la misma la tubería de descarga del mismo diámetro.



Figura AI.10. Salida de agua instalada con el acople de 1/2" de PE
[Fuente: Propia]

Para finalizar el proceso constructivo, y como último fase, se rosca el vaso de expansión a la salida reducida de la T reductora de 1"-1"-3/4", así como la válvula de impulso en el lugar correspondiente.



Figura A1.11. Construcción de la bomba de ariete finalizada
[Fuente: Propia]

ANEXO II

Procedimiento para la construcción de la válvula de impulso partiendo de una válvula no tipo York

Para la construcción de la válvula de impulso para la bomba de ariete se ha partido, en este prototipo, ya que existen múltiples y distintos diseños, de una válvula no retorno de muelle tipo York.



Figura AII.1. Válvula no retorno de muelle tipo York con el vástago de plástico
[Fuente: <http://www.bateriasgatell.com>, revisada el 5 de Marzo de 2013]

A la misma se le va a realizar un agujero en émbolo blanco de la válvula para introducirle, posteriormente, una varilla roscada con el ánimo de poder poner en la misma el peso necesario para que dicha válvula sea capaz de mantenerse abierta hasta que la presión ejercida por el agua venza el peso de la misma y posteriormente, una vez sea disipada la presión ejercida por el agua, sea capaz de abrirse de nuevo, originándose de este modo un ciclo continuo y automático de apertura y cierre de la válvula de impulso.

Materiales que se han utilizado para la construcción de la válvula de impulso:

- Una válvula no retorno de muelle tipo York.
- Un soldador.
- Un taladro con brocas de 2 y 3 mm.
- Una varilla roscada de 3 mm de diámetro.
- Tuercas y arandelas de dicho tamaño.
- Distintas herramientas como llaves inglesas, un tornillo, alicates, etc.

Una vez obtenidos los materiales y disponiendo de un lugar de trabajo adecuado, amplio y despejado, se puede empezar con la construcción de la válvula de impulso.

Lo primero que se ha de hacer es tomar la válvula no retorno, y por el lado donde dispone del muelle, sujetarla de tal forma que quede bloqueada y no se

pueda abrir, quedando cerrada durante este proceso para que cuando se taladre el vástago donde se va a insertar la varilla roscada éste no se mueva y sea posible hacerlo. Ya que en caso de no realizar este paso, es verdaderamente difícil proceder.



Figura AII.2. Lado por el que debe quedar sujeta la válvula no retorno
[Fuente: Propia]

Para ello, en este caso, se le ha puesto un material duro, como puede ser un trozo de madera, de metal o de masilla, y se ha sujetado con cinta adhesiva para que la válvula no se pueda abrir.



Figura AII.3. Válvula no retorno con la sujeción puesta en el lado correspondiente
[Fuente: Propia]

Una vez realizado este paso y habiendo comprobado que la válvula no retorno no se puede abrir aunque empujemos con el dedo el vástago, por quedar bloqueada por la sujeción que se ha realizado, se pondrá la válvula no retorno sobre el tornillo para poder realizar el orificio y evitar de este modo que se mueva mientras nos encontremos en faena. Se trata de una operación muy

delicada y que si se realiza mal, o si se moviera la válvula, podría provocar la rotura del vástago y no serviría dicha válvula no retorno para su modificación en válvula de impulso, a no ser que se cambiara de diseño y se pudiera reutilizar de alguna forma.

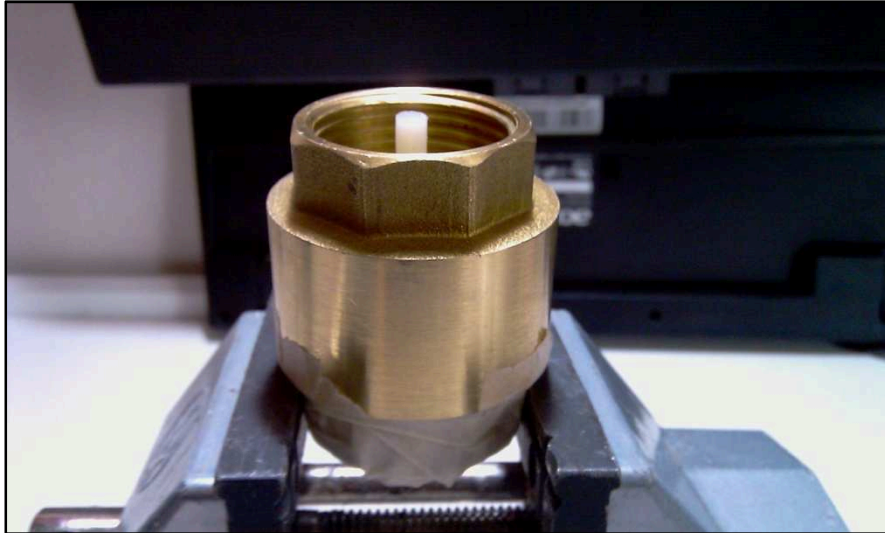


Figura AII.4. Válvula sobre el tornillo
[Fuente: Propia]

Para poder introducir la varilla en el interior del émbolo es conveniente realizar en primer lugar un pequeño agujero centrado con un soldador con el fin de asegurarse que, por lo menos, el orificio que se va a realizar luego con el taladro empiece lo más recto posible.



Figura AII.5. Realizando el pequeño agujero con el soldador
[Fuente: Propia]

Es muy importante que el pequeño agujero, como se ha indicado anteriormente, se encuentre lo más centrado posible ya que si este se encuentra escorado, al realizar la entrada de la varilla con el taladro, se tendrán altas posibilidades de que el vástago se rompa. Es necesario recordar que el

émbolo tiene un diámetro de 5 mm y estamos introduciendo una varilla roscada de 3 mm de diámetro, por lo que la operación debe ser sumamente precisa.

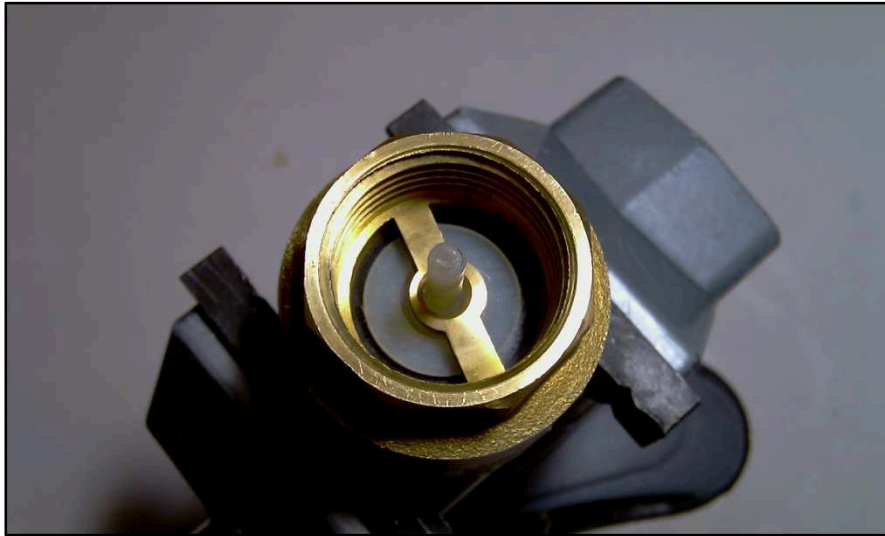


Figura All.6. Detalle del orificio realizado con el soldador
[Fuente: Propia]

Después de haber realizado esta pequeña guía con el soldador, con mucho cuidado y con suma paciencia, se taladra el vástago con una broca fina de 2mm.

Este orificio debe quedar lo más recto posible porque la varilla va a ir roscada al mismo.



Figura All.7. Realizando la guía para la varilla roscada con una broca de 2 mm
[Fuente: Propia]

Para que quede la guía lo más recta posible, es conveniente ir realizando el orificio de manera que la broca se vaya introduciendo muy despacio a través del vástago y comprobando, poco a poco, que se está quedando recto.

Además, es posible corregir la guía si se observa en algún momento que está

quedando torcida, siempre y cuando no atraviese el vástago hacia el exterior.

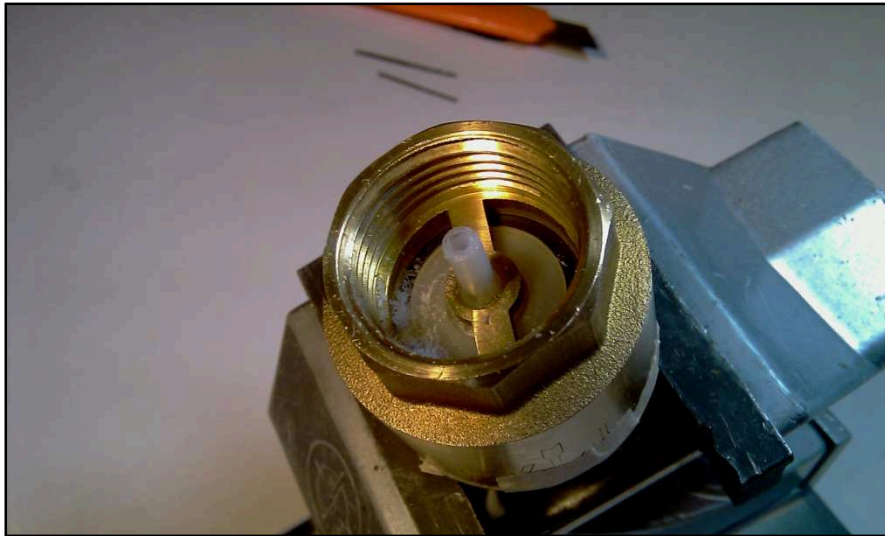


Figura AII.8. Detalle de la guía realizada con la broca de 2 mm
[Fuente: Propia]

Posteriormente, se pasa a ensanchar con una broca de 3 mm la parte superior de la guía con la finalidad de que la varilla roscada entre lo más fácilmente posible dentro del vástago y éste no sufra cuando se esté roscando dentro.

Es importante realizar solamente el orificio con la broca de 3 mm los primeros milímetros del vástago y no todo el orificio como consecuencia de que así la mayoría de la guía será de 2 mm por lo que la varilla roscada de 3 mm quedará bien roscada al vástago y no habrá problemas por una falta de sujeción. Y por otro lado, porque si roscamos la varilla de 3 mm directamente, sin esta pequeña guía de 3 mm sobre el orificio de 2 mm, existen posibilidades de que el vástago se raje como consecuencia de la presión producida por la varilla al roscarla.



Figura AII.9. Realizando la guía con la broca de 3 mm
[Fuente: Propia]

De esta forma, queda la guía finalizada, teniendo como resultado un orificio con un ensanche de 3 mm de diámetro en la parte superior y de 2 mm en el resto.

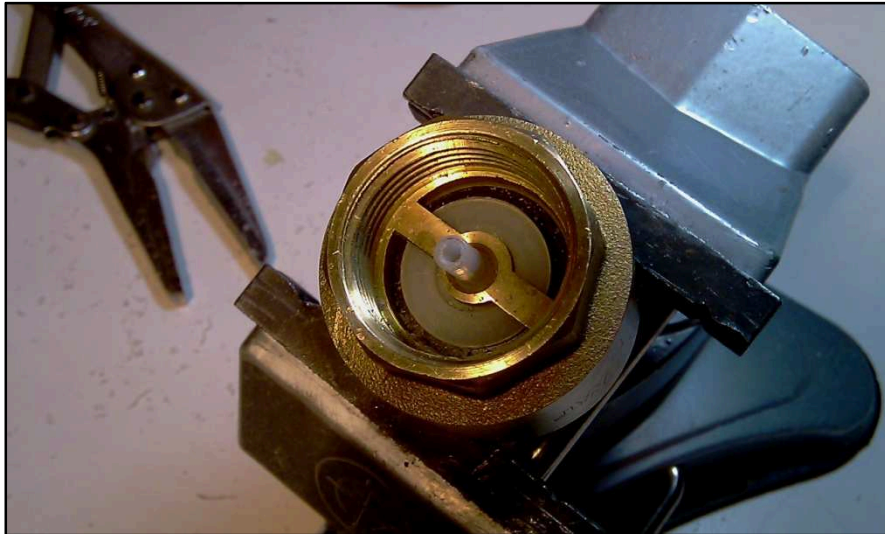


Figura AII.10. Detalle final de la guía
[Fuente: Propia]

Una vez realizada la guía y finalizada, se rosca la varilla de 3 mm en el orificio creado.

Así, para que la varilla de 3 mm rosque mejor, se le puede hacer punta en un extremo de la misma con una lija acoplada al taladro. De este modo, conforme va girando y roscando la varilla, al disponer de punta se introduce mejor que si no la tuviera.



Figura AII.11. Afilando la varilla roscada en un extremo con un taladro
[Fuente: Propia]

Como se ha apuntado anteriormente, una vez realizada la punta, se procede a roscar la varilla de 3 mm en la guía.

Es recomendable hacerle a la varilla una marca aproximadamente en el punto

hasta en cual debe entrar para que cuando se rosque en el orificio no se pase, se acabe haciendo la guía más grande y afectando a la chapa que evita que se produzca el retroceso del fluido.

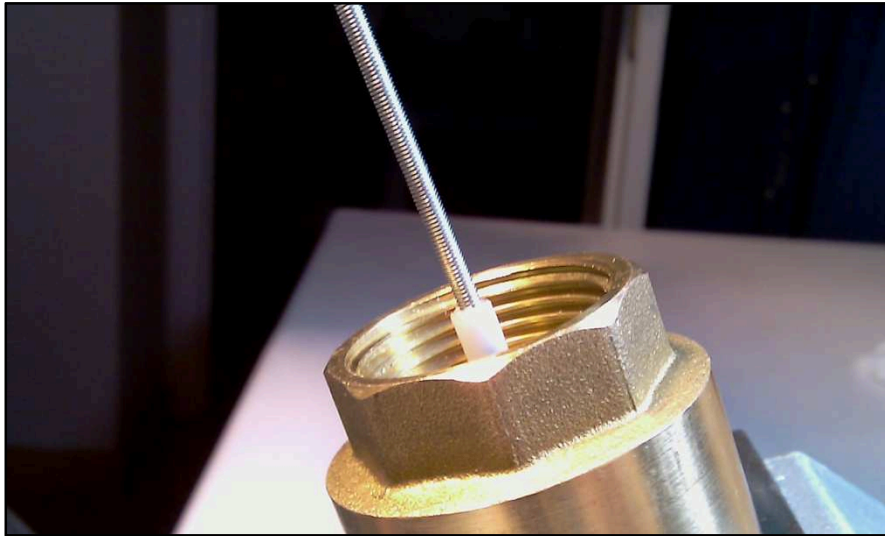


Figura All.12. Roscando la varilla en la guía
[Fuente: Propia]

Roscada la varilla de 3 mm en la guía, se quita la sujeción que hemos puesto en el primer paso para la construcción de la válvula de impulso porque en el siguiente paso trabajaremos con el muelle.

Se debe extraer el muelle que tiene la válvula no retorno para que la válvula quede siempre abierta por la acción del peso colocado en la varilla roscada y se cierre por la presión ejercida por el agua.



Figura All.13. Se puede apreciar el muelle que lleva incorporado la válvula no retorno
[Fuente: Propia]

Para ello, uno se puede servir de un alicate fino o de algún tipo de alambre, pinzas, etc. con el que se enganchará al muelle y poco a poco se irá estirando hasta conseguir extraer el muelle por completo.

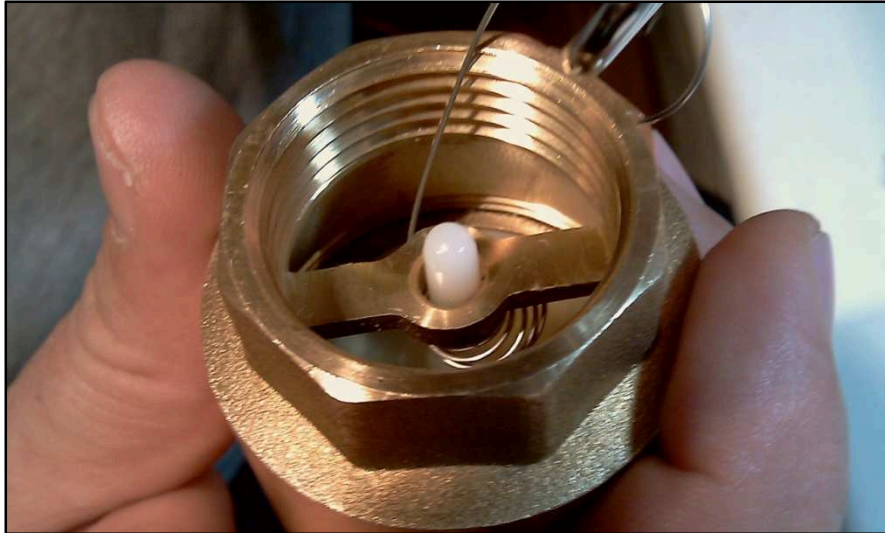


Figura All.14. Estirando y extrayendo el muelle de la válvula no retorno
[Fuente: Propia]

Extraído el muelle, la válvula ya no se cierra automáticamente, sino que ahora se mantiene abierta, como consecuencia de que era el muelle el que se provocaba el cierre.

A continuación, se puede y es recomendable introducir una tuerca de la medida del vástago de plástico blanco. Esta tuerca tendrá dos funciones: por un lado, servirá para reforzar al émbolo, mejorando la unión émbolo-varilla; por el otro, nos va a servir para regular la carrera que deseamos que juegue el vástago de la válvula de impulso, debido a que depende a la altura que la pongamos, la chapa que impide el paso del agua bajará de la posición de cierre en mayor o en menor medida. Este parámetro es muy importante, y tal y como demuestran trabajos realizados, como el de Bustamante Ojeda, A. y Quezada Chuncho, M.E. (2009), influye en el rendimiento de la bomba de ariete.



Figura All.15. Detalle de la tuerca que nos va a permitir modificar la carrera de la válvula de impulso. Válvula de impulso cerrada
[Fuente: Propia]



Figura All.16. Detalle de la tuerca que nos va a permitir modificar la carrera de la válvula de impulso. Válvula de impulso abierta
[Fuente: Propia]

Para finalizar, se introducen los pesos de la válvula de impulso que van a hacer que ésta baje cuando la presión se disipe y así pueda ser el ciclo continuo y automático.



Figura All.17. Válvula de impulso
[Fuente: Propia]

Esto se hace roscando una tuerca y poniéndole encima una arandela y, sobre

ella, pesos en forma de tuercas o de algún material muy pesado, como puede ser el plomo, el hierro, etc.

Es de señalar que, al igual que muestran muchos trabajos citados en la Bibliografía así como durante el presente Proyecto Final de Carrera, el peso colocado en la válvula de impulso dependerá de cara prototipo y de las condiciones de cada lugar, por lo que las tuercas puestas en este caso son orientativas y durante la caracterización hidráulica se determinará el peso ideal que debe mantener la válvula de impulso.

ANEXO III

Procedimiento para la construcción de la válvula de impulso partiendo de una válvula no retorno tipo kent

Otra forma de proceder a la construcción de una válvula de impulso, es la de modificar una válvula no retorno tipo kent para que cumpla con las condiciones que deseamos.



Figura AIII.1. Válvula no retorno tipo kent
[Fuente: Propia]

Esta válvula se diferencia principalmente de la anterior válvula no retorno, desde el punto de vista de nuestro estudio, en que en vez de poseer un disco para el cierre de la misma, se trata de una bola.



Figura AIII.2. Detalle de la bola de la válvula no retorno tipo kent
[Fuente: Propia]

Por el reverso de la misma, igual que en la válvula no retorno tipo muelle, posee un muelle que es el que provoca el cierre de la bola una vez que el fluido

ha pasado por la misma con el fin de que no retorne y esta se cierre.



Figura AIII.3. Detalle del muelle de la válvula no retorno tipo kent
[Fuente: Propia]

Materiales que se han utilizado para la construcción de la válvula de impulso:

- Válvula no retorno tipo kent de 1".
- T de latón de 1".
- Manguito de 1".
- Varilla de 6 mm. de diámetro.
- 10 tuercas de 6 mm. de diámetro.
- 2 arandelas.
- Reducción de 1" a 1/2".
- Reducción de 1/2" a 1/4".
- Machón de 1/4".
- Pesos (tuercas, piezas de hierro pesadas, etc.)
- Taladro.
- Brocas de metal de 5 y 6 mm de diámetro.
- Además se deben disponer otra serie de herramientas como llave inglesa, llave grifa, teflón, etc.

Una vez obtenidos los materiales y disponiendo de un lugar de trabajo adecuado, amplio y despejado, se puede empezar con la construcción de la válvula de impulso.

Para ello, lo primero que se va a hacer es realizar un orificio en la bola de la válvula no retorno por donde va a pasar la varilla de 6 mm. de diámetro.

Para la realización de este orificio y con ánimo de que quede lo más recto posible, se procede a taladrar, en primer lugar, con una broca de 5 mm con la finalidad de obtener la guía por la que pasará la broca de 6 mm.



Figura AIII.4. Realizando la guía con la broca de 5 mm.
[Fuente: Propia]



Figura AIII.5. Realizando el orificio final con la broca de 6 mm.
[Fuente: Propia]

Como resultado se obtiene un orificio de 6 mm. por el que va a ir roscada la varilla del mismo diámetro.



Figura AIII.6. Orificio final en la bola de la válvula no retorno
[Fuente: Propia]

Acto seguido, se rosca la varilla de 6 mm. por dicho orificio que va a ser la que va a soportar los pesos que se van a colocar sobre ella, posteriormente, para que la válvula de impulso sea capaz de vencer la presión del fluido, una vez que la sobrepresión producida por el golpe de ariete anterior se disipe, y se vuelva a abrir, con el claro objetivo de que el proceso sea automático.



Figura AIII.7. Varilla de 6 mm. roscada por el agujero realizado
[Fuente: Propia]

Llegados a este punto, se plantea una cuestión que consideramos de interés. Al roscar la varilla, y una vez atravesada la bola, hay que roscar una tuerca con el fin de que la misma no se salga. Sin embargo, se ve interesante, a su vez, incorporar dos arandelas (una de mayor tamaño que la otra) debido a que el agua debe de empujar la bola y cerrar la válvula para provocar el golpe de

ariete, la sobrepresión. Pero, si en vez de ser redondo el material (bola) a ser empujado por el fluido, es plano, la fuerza del mismo se distribuirá mejor por la superficie y, creemos, que este parámetro contribuiría a mejorar sensiblemente la eficiencia. Esta es la razón por la que se acoplan dos arandelas antes de roscar la tuerca para sujetar la varilla.



Figura AIII.8. Detalle de las arandelas, mientras se aprieta la tuerca
[Fuente: Propia]

Preta la tuerca, se corta la varilla roscada a la altura que consideramos, más o menos unos 30 cm, para no molestar el resto de la construcción de la válvula de impulso.

Una vez roscada la varilla, se extrae el muelle con una ganzúa, o alguna herramienta similar, para que la válvula, en reposo, quede abierta y la fuerza que ejerza el muelle no la cierre.



Figura AIII.9. Extrayendo el muelle de la válvula no retorno
[Fuente: Propia]

Realizados estos pasos, se podía comprobar que la varilla tenía una oscilación

importante, y como a diferencia de la válvula no retorno tipo York ésta no posee una guía por la que pasa la varilla, se decidió hacerle una, a base de piezas de reducciones para que sirva como guía y la varilla no oscile y así no rompa.

Para ello, se debe poner, como primer elemento, una T de latón de 1". Esta T que parece que no hace nada es de vital trascendencia debido a que el agua que atraviesa la válvula de impulso debe salir de alguna manera y si esta no está, con este prototipo, el ariete hidráulico no funcionaría porque el agua no podría escapar.



Figura AIII.10. T de latón de 1"
[Fuente: Propia]

A esta pieza, se le van a ir roscando reducciones con el objetivo de llegar a un orificio por el cual la varilla de 6 mm. de diámetro pase lo suficiente holgada pero sin que oscile demasiado. Así, a la T de latón se le va a roscar una reducción, también de latón de 1" a 1/2".



Figura AIII.10. T de latón de 1" con reducción a 1/2"
[Fuente: Propia]

Una vez puesta la anterior reducción y con el ánimo de seguir haciendo el orificio más pequeño con la finalidad de que la varilla de 6 mm. no oscile y tenga una guía de recorrido, añadiremos otra reducción más, esta vez de 1/2" a 1/4", y un machón de 1/4".



Figura AIII.10. T de latón de 1" con reducción de 1/2" y de 1/4"
[Fuente: Propia]



Figura AIII.10. Pieza guía para la varilla de 6 mm
[Fuente: Propia]

El hecho de que tanto la T como la reducción sean de latón no tiene ninguna importancia mayor y se ha elegido este material por motivos económicos, ya que resulta más barato. Como no tiene que soportar ningún tipo de presión, o sobrepresión, simplemente va a servir, como se ha explicado anteriormente, de escape para el agua impulsora puede ser de este material.

Una vez realizadas las dos piezas por separado, la válvula no retorno tipo Kent modificada y la salida de agua con la pieza guía de la varilla, se roscan ambas para tener el conjunto y dar por finalizada la válvula de impulso.



Figura AIII.10. Válvula de impulso modificada de una válvula no retorno tipo Kent
[Fuente: Propia]

Anexo IV

Presupuesto

A continuación, se detalla el coste que ha acarreado la construcción de la bomba de ariete y la compra de los demás componentes de la instalación realizada durante el presente Proyecto Final de Carrera.

	Precio
BOMBA DE ARIETE	
Curva de 90º de acero galvanizado de 1".	6.86 €
Llave de bola de 1".	10.37 €
Nipple de 100 mm de acero galvanizado de 1".	2.23 €
T de acero galvanizado de 1".	2.26 €
4 manguitos de acero galvanizado de 1".	8.88 €
Válvula no retorno tipo clapeta de 1".	9.99 €
T de acero galvanizado 1"-1"-3/4".	4.86 €
Reducción de acero galvanizado de 1" a 1/2".	1.51 €
Manguito de 1/2" de acero galvanizado.	1.54 €
Llave de bola de 1/2".	5.30 €
Enlace de PE de 1/2".	1.29 €
Vaso de expansión de 8 L.	28.89 €
VÁLVULA DE IMPULSO MODIFICADA DE UNA VÁLVULA NO RETORNO TIPO KENT	
Válvula no retorno tipo Kent de 1".	9.83 €
Varilla de 6 mm. de diámetro.	2.21 €
T de latón de 1".	5.36 €
Manguito de 1".	2.23 €
10 tuercas de 6 mm. de diámetro	0.70 €
2 arandelas	0.12 €
Reducción de 1" a 1/2".	1.56 €
Reducción de 1/2" a 1/4".	0.86 €
Machón de 1/4".	3.73 €
Pesos (tuercas, piezas de hierro pesadas, etc.)	9.16 €
VÁLVULA DE IMPULSO CON VÁLVULA NO RETORNO TIPO CLAPETA	
Válvula no retorno tipo clapeta de 1".	9.99 €
VÁLVULA DE IMPULSO MODIFICADA DE UNA VÁLVULA NO RETORNO TIPO YORK	
Válvula no retorno tipo York de 1"	7.54 €
Varilla de 3 mm. de diámetro	2.21 €

6 Tuercas de 3 mm.	1.50 €
--------------------	--------

TUBERÍA DE IMPULSO

5 Nippels de 1 m. de acero galvanizado de 1"	88.18 €
--	---------

4 Manguitos de acero galvanizado de 1"	5.23 €
--	--------

2 Curvas de 45° de 1" de acero galvanizado	12.49 €
--	---------

Manguito de acero galvanizado de 1"	2.23 €
-------------------------------------	--------

2 Juntas de goma	0.68 €
------------------	--------

TUBERÍA DE DESCARGA

25 metros de tubo de PE de 1/2" 6 bar.	19.78 €
--	---------

total:	269.57 €
---------------	-----------------

