

Anexo A: Alternativas de bombeo disponibles en el mercado.

- Bombas de energía eléctrica.



MODEL		POWER		Q (m³/h)															
Single Phase	Three Phase	kW	HP	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8	5.4		
				Q (l/min)															
				0	5	10	15	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90		
APm30	—	0.3	0.4	H (m)	30	26	20	15	12	8	5	2	-	-	-	-	-		
APm37	—	0.37	0.5		40	35	30	25	20	15	10	5	2	-	-	-	-		
APm60	—	0.6	0.8		60	55	50	40	35	30	25	20	10	5	-	-	-		
APm75	—	0.75	1.0		75	70	60	50	45	35	28	22	15	5	-	-	-		
APm90	—	0.75	1.0		90	75	60	50	35	25	15	5	-	-	-	-	-		
APm110	AP110	1.1	1.5		85	80	75	65	60	55	50	45	40	30	18	10	-		
APm150	AP150	1.5	2.0		90	86	80	75	70	65	60	55	50	40	30	20	10		
—	AP220	2.2	3.0		100	96	90	85	80	75	70	65	60	50	40	30	20		

Figura N° 1. Bomba eléctrica APM110H. Datos de prestaciones.
Fuente: Luzam, 2018.

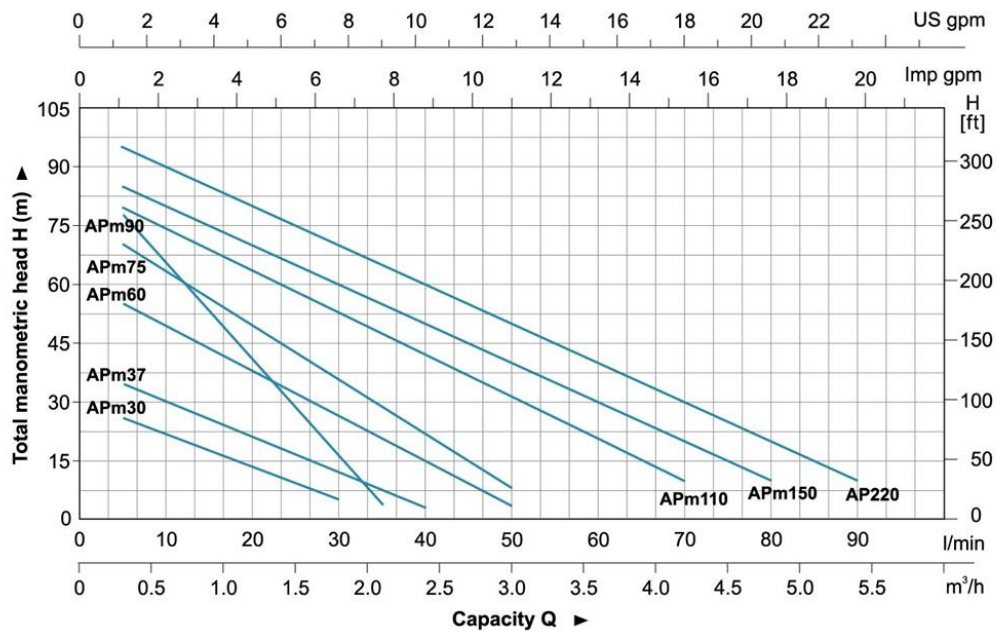


Figura N° 2. Curva de rendimiento hidráulico bomba eléctrica APM110H.
Fuente: Luzam, 2018.



MODELO		POTENCIA (P ₂)		Q	Q															
Monofásica	Trifásica	kW	HP		▲	0	1.2	1.8	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8	5.4	6.0	6.6	7.2	8.4	9.6	
2CPm 25/16C	2CP 25/16C	1.1	1.5	IE3	H metros	47	46	45	44	42	40	38	35	33	30	27	24			
2CPm 25/16B	2CP 25/16B	1.5	2			58	56	55	54	53	51	49	47	45	43	40	37	30		
2CPm 25/16A	2CP 25/16A	2.2	3			68	67	65.5	64.5	63	62	60	58	56	54	51	48	41	32	

Q = Caudal H = Altura manométrica total HS = Altura de aspiración

Tolerancia de las curvas de prestación según EN ISO9906 Grado 3B.

Figura N° 3. Bomba eléctrica 2CP25/16A. Datos de prestaciones.
Fuente: Pedrollo.

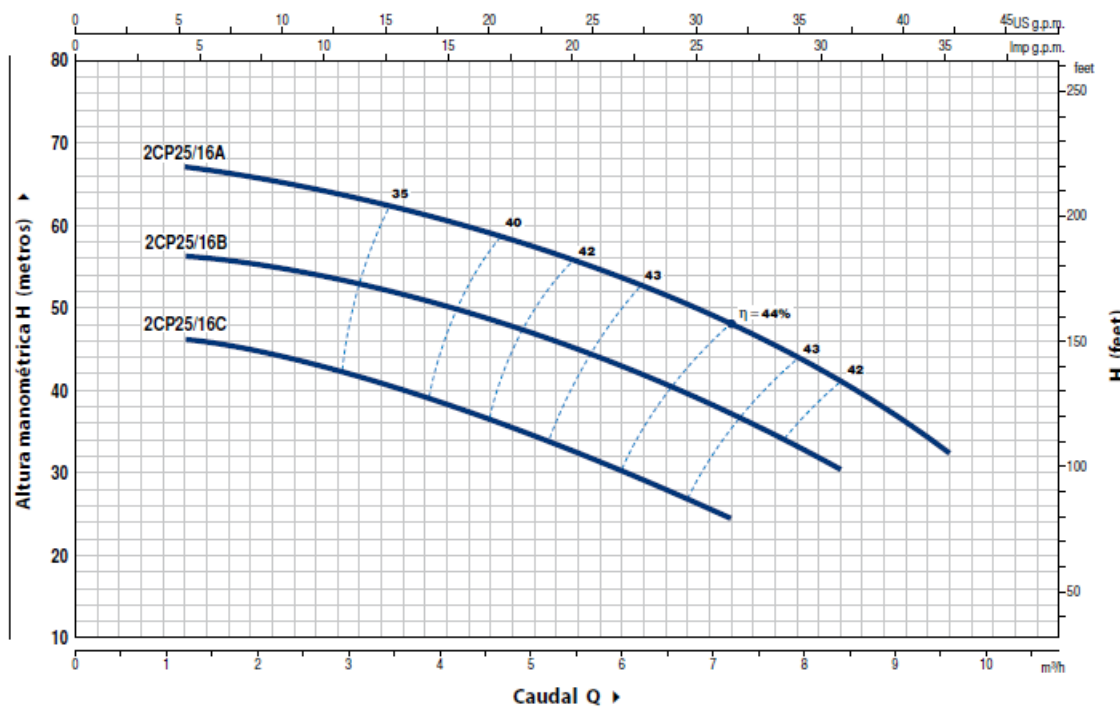


Figura N° 4. Curva de rendimiento hidráulico bomba eléctrica 2CP25/16A.
Fuente: Pedrollo.



MODELO	POTENCIA (P2)		Q	Caudal											
	kW	HP		m ³ /h	0	6	9	12	15	18	24	30	36	42	
Trifásica			l/min	0	100	150	200	250	300	400	500	600	700		
F 40/250C	9.2	12.5	H metros	64	64	63.5	63	62.5	62	60	56.5	52.5	47		
F 40/250B	11	15		71	71	70.5	70	69.5	69	67	64	60	55		
F 40/250A	15	20		88	88	87.5	87	86.5	86	84	81	77	72		

Q = Caudal H = Altura manométrica total HS = Altura de aspiración

Tolerancia de las curvas de prestación según EN ISO9906 Grado 3B.

Figura N° 5. Bomba eléctrica F40/250C. Datos de prestaciones.
Fuente: Pedrollo.

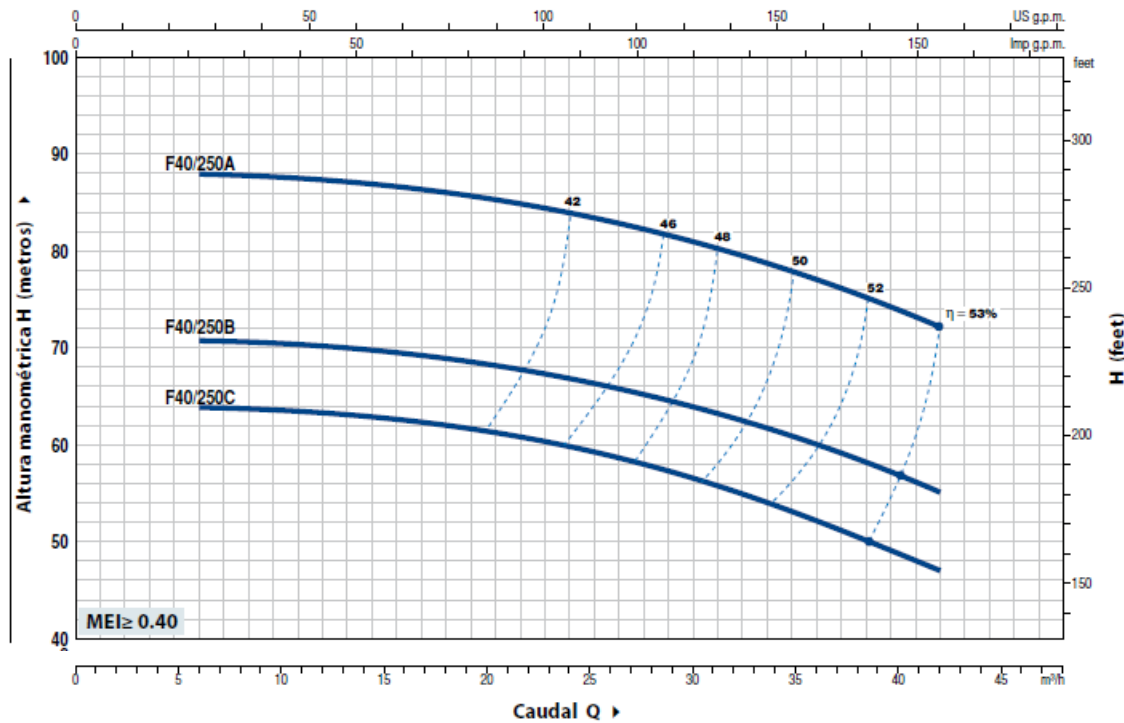


Figura N° 6. Curva de rendimiento hidráulico bomba eléctrica F40/250C.
Fuente: Pedrollo.

- **Bombas de energía fotovoltaica.**

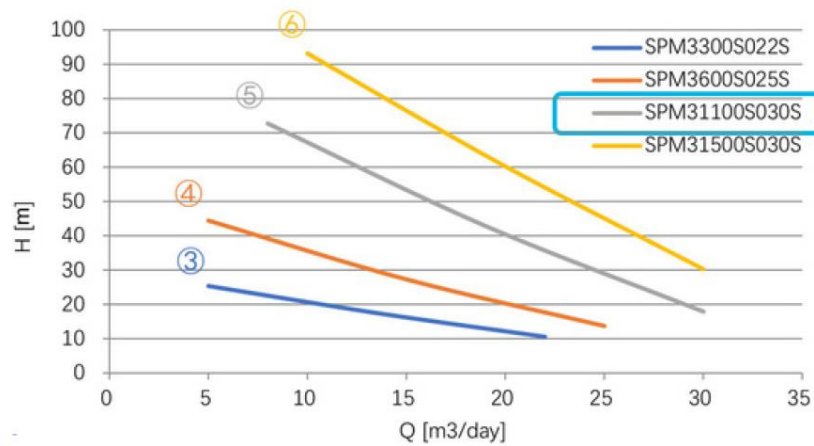


Figura N° 7. Curva de rendimiento hidráulico bomba solar 1320W/ SPM31100S030 S.
Fuente: Rc Solar.

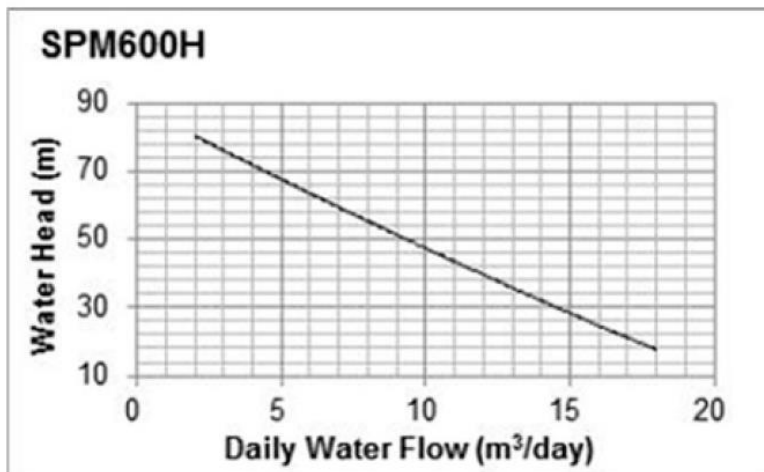


Figura N° 8. Curva de rendimiento hidráulico bomba solar SPM600h/ 920W.
Fuente: Rc Solar.



MODELO		POTENCIA (P ₂)			Q	H metros																		
Monofásica	Trifásica	kW	HP	▲		0	0.6	1.2	1.8	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8	5.4	6.0	6.6	7.2	7.8	8.4	9.0	9.6		
					l/min	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160		
CPm 100	CP 100	0.25	0.33	IE2		16	15	14	12.5	11	9	7												
CPm 130	CP 130	0.37	0.50	IE3		23	22	21	20	19	18	17	15.5	14										
CPm 132	CP 132	0.55	0.75			23	-	22.5	22	21.5	21	20.5	19.5	18.5	17.5	16	14	12						
CPm 150	CP 150	0.75	1			29.5	-	29	28.5	28	27.5	26.5	26	24.5	23	21	18	15						
CPm 158	CP 158	0.75	1			36	34	33.5	33	32.5	31.5	30	28.5	27	25									
CPm 170	CP 170	1.1	1.5			41	-	-	38	37	36	35	33.5	32	30	27.5	25	22						
CPm 170M	CP 170M	1.1	1.5			36	-	-	35	34.5	33.5	33	32	31	30	29	28	26.5	25	23	21	19		
CPm 190	CP 190	1.5	2			48	-	-	46	44.5	43	41.5	40	38	36	34.5	32.5	30.5	28	26				
-	CP 200	2.2	3			56	-	-	55	54.5	53.5	52	51	49.5	48	46	44.5	42.5	40.5	38.5	36			

Q = Caudal H = Altura manométrica total HS = Altura de aspiración

Tolerancia de las curvas de prestación según EN ISO9906 Grado 3B.

Figura N° 9. Alternativa de bombeo con energía fotovoltaica. Bomba CP190
Fuente: Pedrollo.

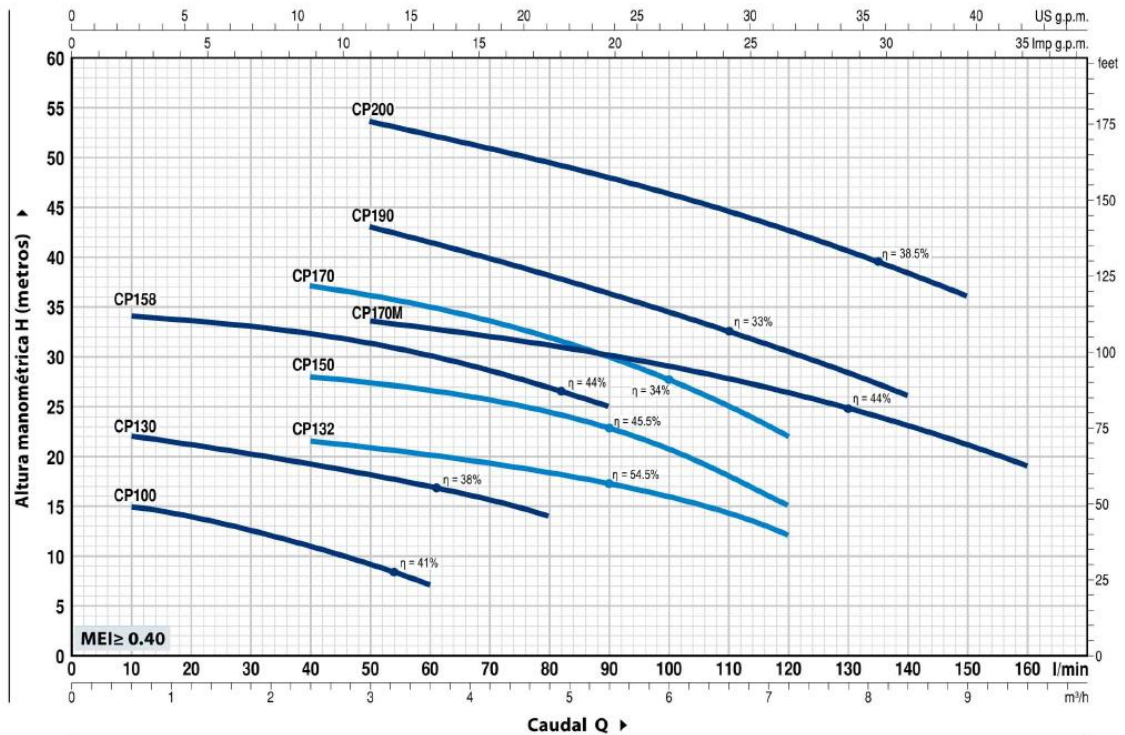


Figura N° 10. Curva de rendimiento hidráulico bomba eléctrica CP190.
Fuente: Pedrollo.

– **Bombas de ariete.**

Tabla N° 1. Cuadro de capacidad de bombeo. Modelo 2 de 1,5”.

BOMBA MODELO ULTRA LIVIANA UL2 DE 1.5 PULGADAS											
		ALTURA DE DESCARGA "H" (Metros)									
		20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0		60.0
ALTURA DE ALIMENTACION "h"(Metros)	1.0	1.7	0.6	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	CAUDAL DE DESCARGA (Metros Cubicos /dia)
	2.0	4.3	3.6	2.6	2.0	1.4	0.3	0.0	0.0	0.0	
	3.0	7.5	5.8	4.6	3.9	3.3	1.9	0.7	0.0	0.0	
	4.0	16.4	12.4	10.1	8.4	5.8	4.6	2.0	0.3	0.0	
	5.0	24.2	16.4	14.2	11.0	7.7	5.9	3.0	1.1	0.4	
	6.0	26.5	17.8	15.7	12.7	9.6	7.2	3.9	1.9	1.1	
	7.0	28.3	19.2	17.3	14.4	11.5	8.5	4.8	2.9	1.9	
	8.0	30.0	22.7	18.8	16.2	13.4	9.8	5.8	3.7	2.8	

Caudal de Alimentacion: 0.5 litros/ segundo.

Fuente: Gutiérrez G., (2023).

Tabla N° 2. Cuadro de capacidad de bombeo. Modelo 2 de 2”.

BOMBA MODELO ULTRA LIVIANA UL2 DE 2 PULGADAS											
		ALTURA DE DESCARGA "H" (Metros)									
		20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0		60.0
ALTURA DE ALIMENTACION "h"(Metros)	1.0	3.0	1.0	1.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	CAUDAL DE DESCARGA (Metros Cubicos /dia)
	2.0	7.6	6.3	4.5	3.5	2.5	0.5	0.0	0.0	0.0	
	3.0	13.1	10.1	8.1	6.8	5.9	3.3	1.3	0.0	0.0	
	4.0	28.8	21.7	17.7	14.6	10.1	8.1	3.5	0.5	0.0	
	5.0	42.4	28.7	24.9	19.2	13.4	10.3	5.2	1.9	0.7	
	6.0	46.4	31.2	27.5	22.2	16.8	12.6	6.8	3.3	1.9	
	7.0	49.5	33.6	30.2	25.2	20.1	14.9	8.5	5.1	3.3	
	8.0	52.5	39.7	32.8	28.3	23.5	17.2	10.1	6.5	4.9	

Caudal de Alimentacion: 1.5 litros/ segundo.

Fuente: Gutiérrez G., (2023).

Tabla N° 3. Cuadro de capacidad de bombeo. Modelo 2 de 3".

BOMBA MODELO ULTRA LIVIANA UL2 DE 3 PULGADAS										
		ALTURA DE DESCARGA "H" (Metros)								
		20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	
ALTURA DE ALIMENTACION "h"(Metros)	1.0	6.7	2.2	2.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2.0	16.7	13.9	10.0	7.8	5.6	1.1	0.0	0.0	0.0
	3.0	28.9	22.3	17.8	15.0	12.9	7.2	2.8	0.0	0.0
	4.0	63.3	47.8	38.9	32.2	22.2	17.8	7.8	1.0	0.0
	5.0	93.3	63.2	54.8	42.2	29.5	22.8	11.4	4.1	1.5
	6.0	102.2	68.6	60.5	48.9	37.0	27.8	15.0	7.2	4.1
	7.0	108.8	74.0	66.4	55.5	44.3	32.8	18.6	11.2	7.2
	8.0	115.5	87.4	72.2	62.2	51.6	37.8	22.2	14.3	10.7

CAUDAL DE DESCARGA (Metros Cubicos /dia)

Caudal de Alimentacion: 3.5 litros/ segundo.

Fuente: Gutiérrez G., (2023).

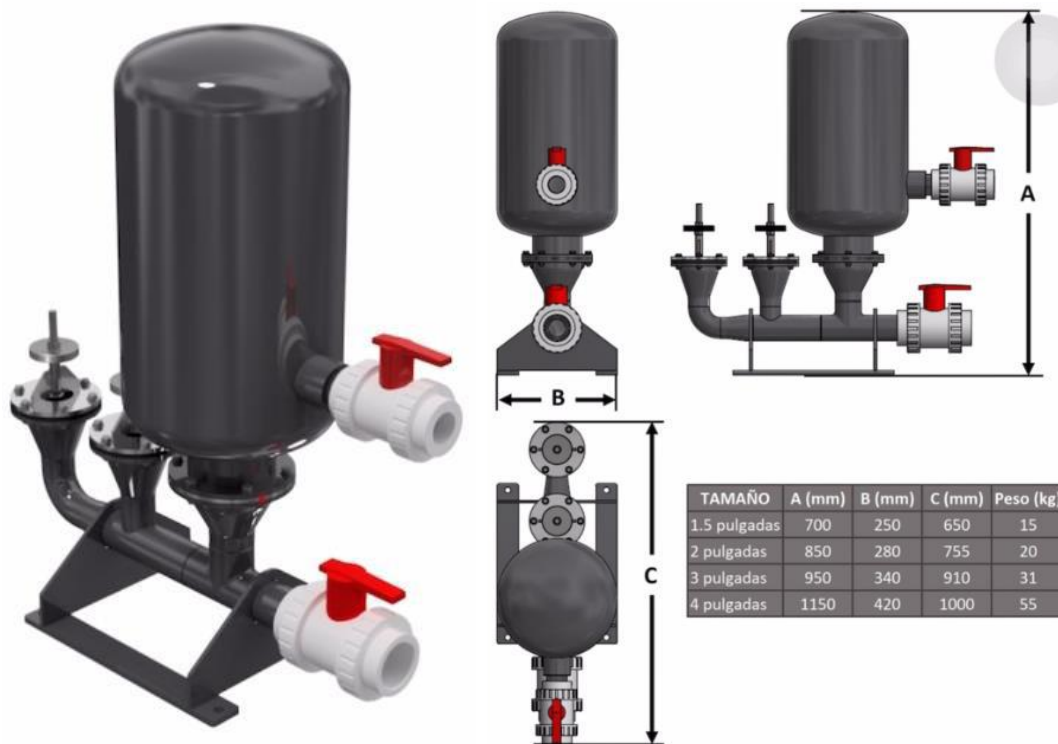


Figura N° 11. Bomba de ariete. "Hidroaxon".

Fuente: Gutiérrez G., (2023).

Anexo B: Tipos de válvulas de impulso.

Las válvulas de impulso desempeñan un papel crucial en el funcionamiento del ariete hidráulico y su variedad permite adaptarse a diferentes condiciones y requerimientos específicos de cada proyecto. Se incluye esta información con el fin de enriquecer el conocimiento sobre las opciones disponibles en el mercado y proporcionar una referencia adicional para quienes estén interesados en explorar más a fondo este aspecto de las bombas de ariete.

A continuación, se describe brevemente los tipos de válvulas de impulso:

- a. Válvula de pletina: Este tipo de válvula de construcción artesanal y consta de materiales de fácil adquisición como: tubos, planchas, pletinas y pernos.

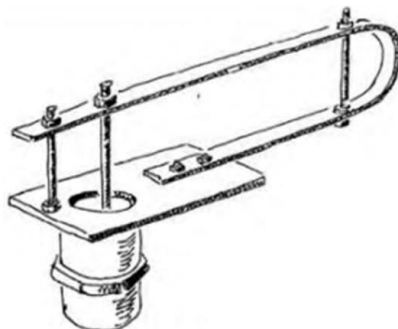


Figura N° 1. Válvula de pletina.
Fuente: Guerra O. y García M., 2014.



Figura N° 2. Bomba de ariete con válvula de pletina.
Fuente: Equipos Practiagro.

- b. Válvula con pesas encima: La construcción de este tipo de válvulas es robusta, lo que asegura una operación apropiada para un ciclo de vida relativamente prolongado. Este

diseño tiene la ventaja de ajustar su carrera y velocidad de cierre con la modificación de su conjunto de pesas. Una desventaja de este tipo de válvulas es que deben estar acomodadas verticalmente para su operación, y así las pesas actúen por gravedad.

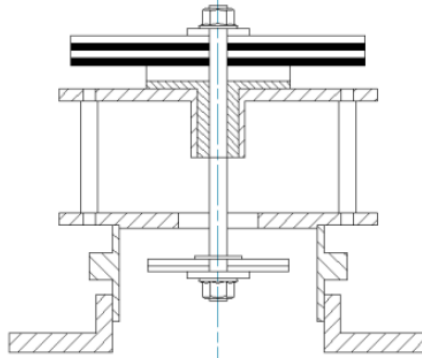


Figura N° 3. Válvula con pesas encima.
Fuente: Guerra O. y García M., 2014.



Figura N° 4. Bomba de ariete con válvula con pesas encima.
Fuente: Gutiérrez G., (2023).

- c. Válvula con pesas debajo: Este tipo de válvula posee un diseño robusto, pero a la vez ligero; su configuración es sólida y las pesas se ubican en la parte inferior de la tapa de la válvula. Estas válvulas tienen las mismas ventajas y desventajas que las válvulas con pesas encima.

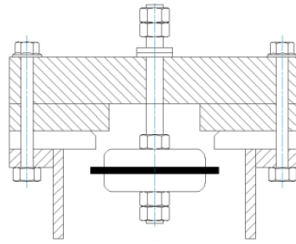


Figura N° 5. Válvula con pesas debajo.
Fuente: Guerra O. y García M. 2014.

- d. Válvula regulada con resorte: Para el diseño de este tipo de válvulas implica cálculos previos y precisos para el tipo de resorte a usar, este resorte gobierna el desplazamiento de la carrera de la válvula. La ventaja de este tipo de válvulas es que pueden operar en formar vertical u horizontal.

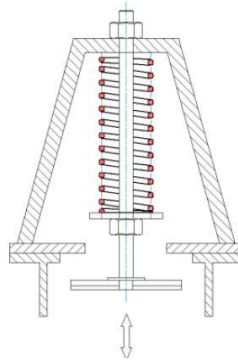


Figura N° 6. Válvula regulada con resorte.
Fuente: Rivadeneira S. y Silva L. 2013.



Figura N° 7. Bomba de ariete con válvula regulada con resorte.
Fuente: Gutiérrez G., 2022.

Anexo C: Tablas para el cálculo teórico.

Tabla N° 1. Propiedades físicas del agua.

Temperatura	Densidad	Viscosidad	Viscosidad cinemática	Módulo de elasticidad volumétrica	Tensión Superficial	Presión de Vapor
°C	ρ kg/m ³	μ N-s/m ² -10 ⁻³	ν m ² /s-10 ⁻⁶	K Pa-10 ⁷	σ N/m-10 ⁻²	p_v Pa
0	999,9	1,792	1,792	204	7,62	588
1	999,9	1,732	1,732			
2	1000,0	1,674	1,674			
3	1000,0	1,619	1,619			
4	1000,0	1,568	1,568			
5	1000,0	1,519	1,519	206	7,54	882
6	1000,0	1,473	1,473			
7	999,9	1,429	1,429			
8	999,9	1,387	1,387			
9	999,8	1,348	1,348			
10	999,7	1,310	1,310	211	7,48	1.176
11	999,6	1,274	1,274			
12	999,5	1,239	1,240			
13	999,4	1,206	1,207			
14	999,3	1,175	1,176			
15	999,1	1,145	1,146	214	7,41	1.666
16	999,0	1,116	1,117			
17	998,8	1,088	1,089			
18	998,6	1,060	1,061			
19	998,4	1,034	1,036			
20	998,2	1,009	1,011	220	7,36	2.447
21	998,0	0,984	0,986			
22	997,8	0,961	0,963			
23	997,6	0,938	0,940			
24	997,5	0,916	0,918			
25	997,1	0,895	0,898	222	7,26	
26	996,8	0,875	0,878			
27	996,5	0,855	0,858			
28	996,3	0,836	0,839			
29	996,0	0,818	0,821			
30	995,7	0,800	0,803	223	7,18	4.297
35	994,1	0,723	0,727	224	7,10	
40	992,2	0,656	0,661	227	7,01	7.400
45	990,2	0,599	0,605	229	6,92	
50	988,1	0,549	0,556	230	6,82	12.22
55	985,7	0,506	0,513	231	6,74	0
60	983,2	0,469	0,477	228	6,68	19.60
65	980,6	0,469	0,478	226	6,58	0
70	977,8	0,406	0,415	225	6,50	30.70
75	974,9	0,380	0,390	223	6,40	0
80	971,8	0,357	0,367	221	6,30	46.40
85	968,6	0,336	0,347	217	6,20	0
90	965,3	0,317	0,328	216	6,12	68.20
95	961,9	0,299	0,311	211	6,12	0
100	958,4	0,284	0,296	207	5,94	97.50

Fuente: UTN – FRBA., 2010.

Tabla N° 2. Tabla de dimensiones de los tubos TUPY.

TUBOS DE CLASE NORMAL ABNT NBR 5587 (SIMILAR ASTM A 53)								
Diámetro Nominal		Diámetro Exterior (D) mm	Clase	Serie (Schedule)	Espesura de Pared (e)		Masa por Metro	
mm	pol				Con Costura mm	Sin Costura mm	Con Costura kg/m	Sin Costura kg/m
6	¼	10,29	N	40	1,70	1,72	0,36	0,36
8	¼	13,72	N	40	2,25	2,24	0,63	0,63
10	⅜	17,25	N	40	2,36	2,31	0,86	0,85
15	½	21,34	N	40	2,80	2,77	1,28	1,27
20	¾	26,67	N	40	2,80	2,87	1,65	1,68
25	1	33,40	N	40	3,35	3,38	2,48	2,50
32	1¼	42,16	N	40	3,55	3,56	3,38	3,39
40	1½	48,26	N	40	3,75	3,68	4,12	4,05
50	2	60,32	N	40	4,00	3,91	5,56	5,44
65	2½	73,03	N	40	5,30	5,16	8,85	8,64
80	3	88,90	N	40	5,60	5,49	11,50	11,29
90	3½	101,60	N	40	5,60	5,74	13,26	13,57
100	4	114,30	N	40	6,00	6,02	16,02	16,07
125	5	141,30	N	40	6,70	6,55	22,24	21,77
150	6	168,28	N	40	7,10	7,11	28,22	28,26

Fuente: Formación industrial, 2022.

Tabla N° 3. Valores típicos de coeficientes de Rugosidad.

Material	Coficiente de Manning n	Cof. Hazen-Williams C _H	Cof. Rugosidad Absoluta e (mm)
Asbesto cemento	0.011	140	0.0015
Latón	0.011	135	0.0015
Tabique	0.015	100	0.6
Fierro fundido (nuevo)	0.012	130	0.26
Concreto (cimbra metálica)	0.011	140	0.18
Concreto (cimbra madera)	0.015	120	0.6
Concreto simple	0.013	135	0.36
Cobre	0.011	135	0.0015
Acero corrugado	0.022	--	45
Acero galvanizado	0.016	120	0.15
Acero (esmaltado)	0.010	148	0.0048
Acero (nuevo, sin recubrim.)	0.011	145	0.045
Acero (remachado)	0.019	110	0.9
Plomo	0.011	135	0.0015
Plástico (PVC)	0.009	150	0.0015
Madera (duelas)	0.012	120	0.18
Vidrio (laboratorio)	0.011	140	0.0015

Fuente: Haestad Methods Engineering Staff, 2002

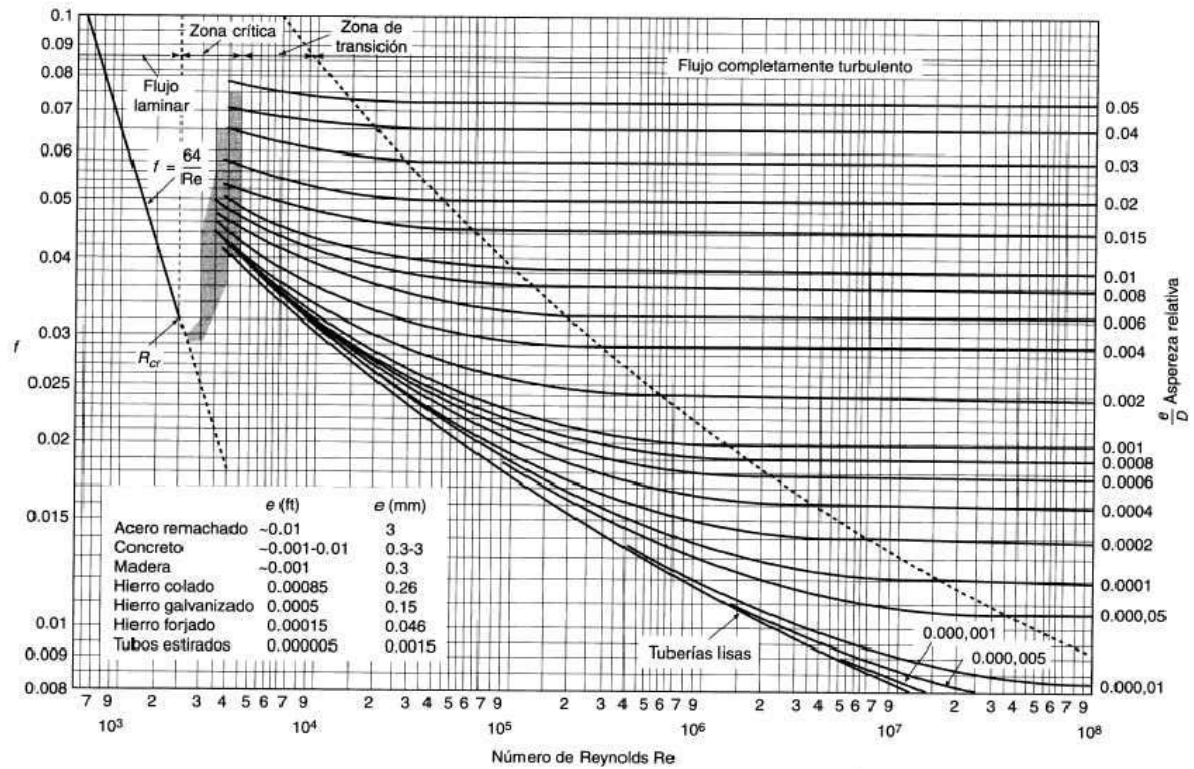


Figura N° 1. Diagrama de Moody.
Fuente: L.F. Moody, 1994.

Tabla N° 4. Coeficientes de pérdidas locales.

	Diámetro nominal, in									
	Roscado				Acoplado					
	1/2	1	2	4	1	2	4	8	20	
Válvulas (abiertas):										
Globo	14	8,2	6,9	5,7	13	8,5	6,0	5,8	5,5	
Compuerta	0,30	0,24	0,16	0,11	0,80	0,35	0,16	0,07	0,03	
De retención	5,1	2,9	2,1	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	
De ángulo	9,0	4,7	2,0	4,5	4,5	2,4	2,0	2,0	2,0	
Codos:										
45° normal	0,39	0,32	0,30	0,29						
45° suave					0,21	0,20	0,19	0,16	0,14	
90° normal	2,0	1,5	0,95	0,64	0,50	0,39	0,30	0,26	0,21	
90° suave	1,0	0,72	0,41	0,23	0,40	0,30	0,19	0,15	0,10	
180° normal	2,0	1,5	0,95	0,64	0,41	0,35	0,30	0,25	0,20	
180° suave					0,40	0,30	0,21	0,15	0,10	
<<Tes>>										
Flujo directo	0,90	0,90	0,90	0,90	0,24	0,19	0,14	0,10	0,07	
Flujo lateral	2,4	1,8	1,4	1,1	1,0	0,80	0,64	0,58	0,41	

Fuente: White M., 2004.

Tabla N° 5. Coeficientes de resistencia locales según P. G. Kiseliov.

Entrada en el tubo para bordes agudos.....	$\zeta = 0.50$
Entrada suave en el tubo.....	$\zeta = 0.50 - 0.20$
Ensanchamiento repentino.....	$\zeta = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2$
Estrechamiento repentino.....	$\zeta = 0.5 \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2$
Cono de transición (para $d_2 = 2d_1$).....	$\zeta = 5.0$
Cono de transición (para $d_2 \approx 0.5d_1$).....	$\zeta = 0.20$
Giro brusco a 90°	$\zeta = 1.20$
Giro suave a 90°	$\zeta = 0.15$
Salida del tubo por debajo del nivel.....	$\zeta = 1.0$
Válvula de disco totalmente abierta.....	$\zeta = 0.10$
Válvula de compuerta totalmente abierta.....	$\zeta = 0.11 - 0.12$
Diferentes robinetes totalmente abiertos.....	$\zeta = 5.0$
Válvulas de sujeción con bombas provistas de mallas.....	$\zeta = 10.0$
Entrada suave en el canal.....	$\zeta = 0.10$
Entrada en el canal con bordes de entrada agudos (con presión lateral).....	$\zeta = 0.40$
Estrechamiento suave del canal.....	$\zeta = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2$
Estrechamiento suave del canal ($A_2 < A_1$).....	$\zeta = 0.10$

Fuente: Pashkov N. y Doolqachev F., 1985.

Anexo D: Prototipo de Bomba de ariete de 1”.

Previo al inicio de la fase de construcción del prototipo de ariete hidráulico, se llevó a cabo una exhaustiva revisión de literatura, que incluyó la consulta de videos, manuales, estudios científicos y experiencias prácticas relacionadas con el diseño y funcionamiento de arietes hidráulicos. Esta revisión bibliográfica permitió comprender en profundidad los principios de operación del ariete hidráulico, así como identificar los materiales, herramientas y técnicas necesarios para la construcción del prototipo.

- **Materiales.**

Los materiales utilizados en la construcción del prototipo de ariete hidráulico fueron adquiridos en una ferretería local. La disponibilidad de estos materiales en la ferretería facilitó el proceso de adquisición y permitió iniciar rápidamente la etapa de construcción del prototipo.

Es importante destacar que la elección de materiales se realizó con un enfoque en la accesibilidad y la economía, sin comprometer la calidad y la eficiencia del prototipo. La utilización de elementos estándar disponibles en una ferretería local aseguró la replicabilidad del diseño y la posibilidad de realizar ajustes y mejoras en el futuro según fuera necesario.

Tabla N° 1. Materiales para construcción del prototipo (Cantidad y costo).

Número	Cantidad	Unidad	Material	Costo unitario (Bs)	Costo total (Bs)
1	1	Pza.	Espiga de 1" con rosca macho de 1"	5	5
2	1	Pza.	Espiga de ½" con rosca macho de ½"	2	2
3	1	Pza.	Llave de paso de 1"	20	20
4	1	Pza.	Llave de paso de ½"	10	10
5	5	Pza.	Niples de 1"	3	15
6	2	Pza.	Niples de ½"	1,5	3
7	2	Pza.	Tees de 1"	15	30
8	1	Pza.	Codo de 1"	10	10
9	1	Pza.	Válvula de pie de 1"	40	40
10	1	Pza.	Válvula de no retorno de 1"	65	65
11	1	Pza.	Reducción de PVC de 1" a ¾" (con rosca)	2	2
12	1	Pza.	Reducción de PVC de 1" a ½" (con rosca)	2	4
13	1	Pza.	Adaptador macho de ¾"	3	3
14	0,5	m	Tubo de PVC roscable de ¾"	4	2
15	1	m	Tubo de PVC de 1 ½"	12	12

Continuación de la tabla 9					
Número	Cantidad	Unidad	Material	Costo unitario (Bs)	Costo total (Bs)
16	1	Pza.	Buje reductor de 1 ½" a ¾" (con junta para pegar)	5	5
17	1	Pza.	Acoplamiento de PVC de 1 ½"	10	10
18	1	Pza.	Tapón hembra PVC de 1 ½" (sin rosca)	7	7
19	3	-	Cinta teflón	2	6
20	1	-	Pegamento para tubos y accesorios de PVC	6	6
21	8	m	Manguera de goma de 1"	8	64
22	12	m	Manguera de goma de ½"	2	24
23	1	Pza.	Reductor ½" a ¼"	12	12
24	1	Pza.	Tee de ½"	2,5	2,5
25	1	Pza.	Manómetro (entrada ¼")	50	50
					409,5

Fuente: Elaboración propia.

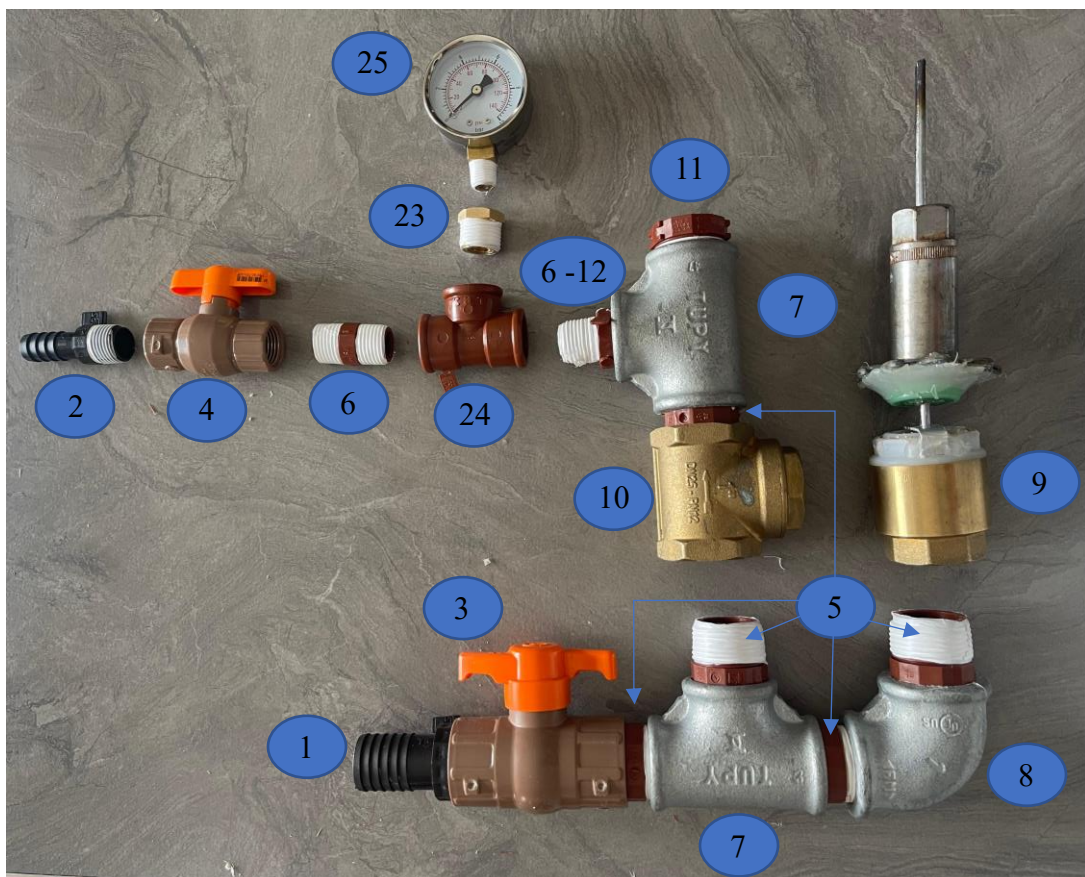


Figura N° 1. Materiales para construcción del cuerpo del prototipo de 1".

Fuente: Elaboración propia.




Figura N° 2. Materiales para construcción del prototipo de bomba de ariete.
Fuente: Elaboración propia.

- **Descripción de los componentes adquiridos para el prototipo.**

Tabla N° 2. Detalle de componentes adquiridos para el prototipo.

<p>Espiga de 1" con rosca macho 1": Permite la unión de la manguera de 1" que será empleada como conducto de impulsión y la llave de paso de 1".</p> <p>Espiga de 1/2" con rosca macho 1/2": Une la manguera de 1/2" empleada como conducto de descarga con la llave de paso de 1/2".</p>	
<p>Mangueras de 1" y 1/2" empleadas como conducto de alimentación y descarga respectivamente.</p>	
<p>Llave de paso 1" y 1/2": Utilizado para controlar el flujo de agua que ingresa de la fuente a la bomba de ariete y la que sale de la bomba respectivamente.</p>	
<p>Niples de 1" y niples de 1/2": piezas con rosca en sus extremos utilizados para unir accesorios, como codos, tees o válvulas.</p>	

<p>Tees de 1": utilizada para conectar una línea de tubería principal con una línea secundaria en un ángulo de 90°, permitiendo el flujo en dos direcciones a partir de una tubería principal.</p>	
<p>Codo de 1": este accesorio tiene una forma curva que permite cambiar la dirección de una tubería en un ángulo de 90 grados.</p> <p>En este caso permite que el flujo se dirija hacia arriba, se une a la válvula de retención.</p>	
<p>válvula de pie de 1": desempeña la función de válvula de impulsión en el sistema.</p> <p>Para su correcta instalación, se requiere retirar el resorte y cambiar su orientación, de manera que la flecha de indicación apunte hacia abajo.</p>	
<p>Válvula de no retorno de 1" (retención): desempeña la función de retención.</p> <p>Esta válvula se encarga de permitir el flujo unidireccional del líquido, evitando que este retroceda. La orientación de la flecha es hacia arriba.</p>	

Reducciones de PVC de 1" a 3/4" y 1" a 1/2" (con rosca) son accesorios que permiten reducir el diámetro de la tubería en una sección específica del sistema, permitiendo una transición suave y eficiente entre ellas.



Adaptador macho 3/4" es un accesorio que facilita la conexión en un extremo con otros accesorios o tuberías con rosca hembra mientras que en el otro tiene una superficie lisa que permite la unión con otro componente, en este caso una tubería.



Tubo de PVC roscable de 3/4" y tubo de PVC de 1 1/2", cumpliendo la función de cámara de aire.



<p>Buje reductor 1 ½” a ¾” (con junta para pegar) es un accesorio utilizado para conectar dos tuberías con diámetros diferentes mediante el proceso de pegado, permite reducir el tamaño de la tubería en una conexión específica.</p>	
<p>Acoplamiento de PVC de 1 ½” (copla) proporciona una conexión segura y estanca entre dos tramos de tubería de PVC que manejan fluidos a presión</p>	
<p>Tapón hembra PVC sin rosca de 1 ½” empleado para sellar o cerrar el extremo de la tubería que se usó para la cámara de aire.</p>	
<p>Rollos de cinta teflón es utilizado principalmente para sellar roscas de tuberías y accesorios en sistemas de fontanería, proporciona un sellado hermético que evita fugas y ayuda a lubricar las roscas, facilitando el ensamblaje y evitando el bloqueo de las conexiones.</p>	

<p>Pegamento para tubos y accesorios PVC es un adhesivo formulado para unir y sellar herméticamente conexiones de tuberías empleadas en el sistema.</p>	
<p>Reductor de 1/2" a 1/4" es utilizado para incluir/unir el manómetro al prototipo de ariete (se enrosca a la Tee de 1/2")</p>	
<p>Tee de 1/2" utilizada para conectar una línea de tubería principal con una línea secundaria (manómetro) en un ángulo de 90°.</p>	
<p>Manómetro de 10 bar. funciona midiendo la presión del agua dentro del sistema.</p>	

Fuente: Elaboración propia.

- **Montaje del prototipo de ariete hidráulico.**

El proceso de armado del prototipo de bomba de ariete inicia con el ensamblaje del tubo de 1 ½" de diámetro y un metro de longitud. En uno de sus extremos se inserta el tapón de PVC de 1 ½" (sin rosca), asegurándolo firmemente. En el extremo opuesto del tubo se fija el acoplamiento de PVC de 1 ½", al cual se adhiere el buje reductor de 1 ½" a ¾". Este último se conecta al tubo de ¾" de longitud de 10cm.

En el extremo libre del tubo de ¾", se coloca un adaptador macho de ¾", completando así la primera etapa del ensamblaje. Para garantizar la integridad estructural y hermeticidad del conjunto, todas las conexiones se realizan utilizando pegamento especial para tubos y accesorios de PVC.

Después de completar las conexiones concluimos con el ensamblado de la cámara de aire.



Figura N° 3. Ensamblado de cámara de aire del prototipo de bomba de ariete.
Fuente: Elaboración propia.

Se procede a preparar las piezas con conexiones roscadas para su ensamblaje. Se aplica cinta de teflón en todas las roscas de estas conexiones. La cinta de teflón se enrolla alrededor de las roscas para crear un sello hermético que evita posibles fugas de líquidos o aire a través de las juntas (Ver figura 23). Este material facilita el proceso de ensamblaje al reducir la fricción entre las roscas, permitiendo un ajuste más suave y preciso de las piezas.



Figura N° 4. Preparación de piezas con conexiones roscadas.
Fuente: Propia.

La parte roscable del adaptador de $\frac{3}{4}$ " se une con la reducción de 1" a $\frac{3}{4}$ ". En el extremo de 1" de la reducción de PVC se conecta una de las Tee de 1" (en este caso de acero galvanizado). De la salida secundaria de la Tee, se continúa con una reducción de 1" a $\frac{1}{2}$ ", seguida de un niple de $\frac{1}{2}$ ", una Tee de $\frac{1}{2}$ " que en su salida secundaria se une a una reducción de $\frac{1}{2}$ " a $\frac{1}{4}$ ", en la salida de $\frac{1}{4}$ " se enrosca el manómetro de 10 bar. En el extremo libre de la Tee de PVC de $\frac{1}{2}$ " se enrosca un niple de $\frac{1}{2}$ ", seguido por una llave de paso de $\frac{1}{2}$ " y luego una espiga de $\frac{1}{2}$ ". Esta última facilita la sujeción de la manguera que se utilizará como conducto de descarga.



Figura N° 5. Línea secundaria. Manómetro y conducto de descarga.
Fuente: Elaboración propia.

En el extremo libre de la Tee de 1", se instala un niple de PVC de 1", con el propósito de conectarlo a la válvula de no retorno (retención) de 1". Es importante tener en cuenta la orientación de la válvula, indicada por una flecha que debe apuntar hacia arriba, asegurando así su correcto funcionamiento (Ver figura 25).



Figura N° 6. Orientación de la válvula de retención del prototipo de bomba de ariete.
Fuente: Elaboración propia.

En el extremo inferior de la válvula de retención, se instala un niple de 1" para luego conectar esta parte con la segunda Tee de 1", que se posiciona en una ubicación diferente a la primera Tee (ver figura 26).

En uno de los extremos de esta segunda Tee, se rosca un niple de 1", seguido por un codo de 1", y luego otro niple de 1" que servirá para unir el codo con la válvula de pie de 1" (Se modificó la válvula de pie quitándole el resorte y el filtro y agregando un accesorio que permitiera agregar peso a la válvula). La dirección de la flecha de la válvula de pie debe apuntar hacia abajo (ver figura 26).



Figura N° 7. Orientación de la válvula de impulsión del prototipo de bomba de ariete.
Fuente: Elaboración propia.

En el extremo libre de la segunda Tee de acero galvanizado, se coloca un niple de 1", el cual se utiliza para conectar la Tee con la llave de paso de 1". A la llave de paso se le rosca la espiga de 1". Esta espiga proporciona un punto de sujeción para la manguera de 1" que se utilizará como conducto de suministro.



Figura N° 8. Montaje final del prototipo de ariete hidráulico.
Fuente: Elaboración propia.



Figura N° 9. Vista general del prototipo de ariete hidráulico.
Fuente: Elaboración propia.

Proceso de prueba del prototipo de ariete hidráulico.

La prueba del funcionamiento del prototipo de bomba de ariete se realizó en las cascadas de Coimata en el departamento de Tarija.

Se seleccionó un lugar cercano a la cascada para realizar la prueba, verificando que se pudiera obtener el desnivel necesario para el funcionamiento de la bomba.

Los datos de altura de alimentación, altura de descarga medidos en campo fueron:

Altura de suministro: $H_a = 1,8 m$

Altura de descarga: $H_d = 9,83 m$

Se ubicó el conducto de alimentación, que tiene en uno de sus extremos un filtro que impide el ingreso de sedimentos y partículas que puedan obstruir y dificultar el correcto funcionamiento del prototipo.

Inicialmente, se llevó a cabo un aforo para determinar el caudal de ingreso disponible. Utilizando un recipiente de 50 litros, se cronometró el tiempo requerido para que este se llenase completamente. El tiempo obtenido fue de 120 segundos.



Figura N° 10. Aforo de caudal de suministro.
Fuente: Propia

Se conectó el otro extremo de la manguera a la espiga de 1" integrada en el prototipo de la bomba de ariete, preparando así el equipo para su prueba operativa. Inicialmente, todas las llaves de paso se mantuvieron cerradas.



Figura N° 11. Ajustes previos al funcionamiento del prototipo.
Fuente: Propia.

El procedimiento comenzó con la apertura de la llave de ingreso a la bomba, permitiendo que el agua fluyera a través del sistema. Se asistió manualmente a la válvula de impulso para iniciar su funcionamiento autónomo, facilitando los golpes de ariete de manera automática, para esto fueron necesario añadir peso a la válvula de impulso. Una vez establecida la operación cíclica de la válvula de impulso, se procedió a abrir la llave de paso de salida, permitiendo que el agua fuera bombeada a una altura superior a la de su punto de ingreso.



Figura N° 12. Funcionamiento del prototipo de ariete hidráulico.
Fuente: Propia.

Finalmente, a diferentes alturas se leía la presión que marcaba el manómetro y se cronometró el tiempo que tardaba en llenarse un recipiente de 0,7 litros. Con estos valores se obtendrá el caudal bombeado con el prototipo de 1" a diferentes alturas de descarga.



Figura N° 13. Aforo de caudales bombeados por el prototipo de 1".
Fuente: Propia.

Cálculos teóricos hidráulicos

Como se mencionaba anteriormente la elaboración del prototipo de ariete hidráulico de una pulgada se basó en la necesidad de explorar y comprender el funcionamiento del ariete hidráulico en un contexto experimental, donde se simplificó el diseño y la construcción para centrarse en los principios básicos de operación.

A continuación, se calculará el rendimiento volumétrico teórico y práctico del prototipo de bomba de ariete.

Datos preliminares:

Altura de impulsión o alimentación (H_a):

$$H_a = 1,8 \text{ m}$$

Altura de elevación máxima (H_d): El manómetro indicaba 14 psi (1 bar), por lo tanto, la altura de descarga máxima es:

$$H_d = \frac{14 * 6894,76}{1000 * 9,81}$$

$$H_d = 9,83 \text{ m}$$

Caudal de alimentación (Q):

$$Q = \frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}}$$

$$Q = \frac{50 \text{ l}}{120 \text{ s}} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}$$

$$Q = 25 \text{ l/min}$$

Cálculos hidráulicos¹

Rendimiento:

El rendimiento del ariete hidráulico representa el porcentaje de agua que se puede bombear en relación al total de la canalizada por el ariete, y varía en función del cociente H_d/H_a . Al

¹ Jiménez J.M. (2005). Fabríquelo usted mismo: El ariete hidráulico. News Soliclíma.

aumentar el valor resultante, el rendimiento disminuye. En la tabla 11 puede verse cómo varía el rendimiento energético.

Tabla N° 3. Rendimiento energético del ariete hidráulico.

H_d/H_a	2	3	4	6	8	10	12
R	0,85	0,81	0,76	0,67	0,57	0,43	0,23

Fuente: Jiménez J.M., 2005.

En la instalación del proyecto, el ratio entre ambas alturas es:

$$H_d/H_a = 9,83/1,8$$

$$H_d/H_a = 5,46$$

Interpolando se obtiene el valor del rendimiento:

$x_1 = 0,76$	$y_1 = 4$
$x_0 = ?$	$y_0 = 5,46$
$x_2 = 0,67$	$y_2 = 6$

$$X_0 = \frac{(x_2 - x_1)(y_0 - y_1)}{(y_2 - y_1)} + x_1$$

$$X_0 = \frac{(0,67 - 0,76)(5,46 - 4)}{(6 - 4)} + 0,76$$

$$X_0 = R = 0,69$$

El caudal elevado (q) depende del rendimiento (R), el caudal de alimentación (Q), el desnivel de trabajo (H_a) y la altura de elevación (H_d). El caudal de elevación se puede estimar por la fórmula siguiente (Ma Chi, 2002):

$$(H_d/H_a) * q = R * Q$$

Siendo:

q : Caudal elevado (l/min).

R : Rendimiento energético teórico del ariete hidráulico.

Q : Caudal de alimentación (l/min).

H_d/H_a : Ratio entre las distintas alturas (m/m).

Al despejar “q” de la fórmula anterior se obtiene el caudal elevado:

$$q = R * Q * \frac{H_a}{H_d}$$

$$q = 0,69 * 25 * (1,8/9,83)$$

$$q = 3,16 \text{ l/min}$$

Potencia del ariete hidráulico (P):

$$q = 3,16 \frac{\text{l}}{\text{min}} * \frac{1\text{m}^3}{1000\text{l}} * \frac{1\text{min}}{60\text{s}} = 5,27 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$P = \gamma * q * H_d = (1000 * 9,81) * 5,27 \times 10^{-5} * 9,83 = 5,08 \text{ W}$$

Rendimiento volumétrico (η_v):

$$\eta_v = \frac{q}{Q} * 100$$

$$\eta_v = \frac{3,16}{25} * 100 = 12,64\%$$

El rendimiento volumétrico obtenido a partir del caudal de descarga obtenido en campo es:

Caudal de descarga (q): Un recipiente de 0,7 litros se llenó en 75 segundos.

$$q = \frac{V}{t} = \frac{0,7}{75} = 9,33 \times 10^{-3} \text{ l/s} = 0,56 \text{ l/min}$$

Rendimiento volumétrico (η_v):

$$\eta_v = \frac{q}{Q} * 100$$

$$\eta_v = \frac{0,56}{25} * 100 = 2,24\%$$

En la tabla 12 se muestran los datos de volumen, tiempo y presión obtenidos de la prueba en campo del prototipo de 1".

Tabla N° 4. Datos de prueba en campo, prototipo de 1".

Presión	Volumen	Tiempo	Golpes por minuto
(psi)	(l)	(s)	
3,3	0,7	23	45
5	0,7	30	45
7	0,7	45	45
10	4	294	42
12	0,7	64	42
14	0,7	75	42

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la presión medida con el manómetro (en psi) se calcula la altura de descarga con la ecuación:

$$P = \rho * g * h \rightarrow h = \frac{P(\text{psi}) * 6894.76(\text{Pa})}{\rho * g}$$

Se asume $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ y $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

El caudal es el cociente del volumen del recipiente empleado y tiempo que tardo en llenarse este último.

$$Q = \frac{\text{Volumen}}{\text{tiempo}}$$

Los resultados del cálculo se muestran en la tabla 13.

Tabla N° 5. Datos para curvas características del prototipo de 1".

Presión	Altura	Volumen	Tiempo	Caudal		Golpes por minuto
				(l/s)	(l/min)	
3,3	2,319	0,7	23	0,030	1,83	45
5	3,514	0,7	30	0,023	1,40	45
7	4,920	0,7	45	0,016	0,93	45
10	7,028	4	294	0,014	0,82	42
12	8,434	0,7	64	0,011	0,66	42
14	9,840	0,7	75	0,009	0,56	42

Fuente: Elaboración propia.

Anexo E: Prueba en campo. Bomba de ariete de 4”

Las pruebas en campo de la bomba comercial se realizaron en la propiedad del Sr. Mario Soliz, situada en la comunidad Cabecera El Nueve, en la localidad de Bermejo, Tarija.

Inicialmente, se midieron las dimensiones de la bomba, así como las de las tuberías de suministro y descarga. Este proceso se llevó a cabo utilizando un pie de rey, un flexómetro y una wincha, los valores obtenidos se muestran en la tabla 14.

Tabla N° 1. Dimensiones de la bomba de ariete comercial, tuberías de suministro y de descarga.

Componente	Dimensión
Diámetro de la tubería de alimentación	2 pulg
Longitud de la tubería de alimentación	28,2 m
Diámetro de entrada a la bomba	2 pulg
Diámetro del cuerpo de la bomba	4 pulg
Diámetro de las válvulas de impulsión.	3 pulg
Diámetro de la válvula de retención	3 pulg
Diámetro de la cámara de aire	4 pulg
Longitud de la cámara de aire	0,95 m
Diámetro de la tubería de descarga	$\frac{3}{4}$ pulg
Longitud de la tubería de descarga	240 m

Fuente: Elaboración propia.





Figura N° 1. Medición de diámetros y longitudes de la bomba comercial.
Fuente: Propia.

Antes de poner en funcionamiento la bomba de ariete en estudio, se midió el caudal de alimentación. Para ello, se empleó un recipiente de 50 litros y, con ayuda de un cronómetro, se calculó el tiempo que tarda en llenarse.



Figura N° 2. Medición del caudal de suministro.
Fuente: Propia.

Con la asistencia de aplicaciones móviles (My Altitude, Altimeter, Altimetro GPS, Datos GPS), se registró que la altitud en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) del punto de ubicación de la bomba de ariete es de 564,5 m. y sus coordenadas son:

Latitud: 22° 40' 25.61"S y Longitud: 64° 20' 21.24"W.

De la misma manera se obtuvo la altura del punto de la fuente de suministro, registrando que está a una altura de 567,8 m. y sus coordenadas son: Latitud: 22° 40' 24.57"S y Longitud: 64° 20' 20.84"W. Con un flexo se midió la altura de la pared que permitía el almacenamiento del agua en la fuente de suministro (1,8 m), para con estos valores obtener el desnivel entre el punto donde se encuentra instalado el ariete y el espejo de agua del tanque de almacenamiento.

Debido a que el valor de la altura de suministro es un parámetro sensible e importante, con el nivel de manguera también se obtuvo el desnivel entre el espejo de agua de la fuente y la bomba en funcionamiento. $H_d = 5,1m$.



Figura N° 3. Medición de la altura de suministro con nivel de manguera.
Fuente: Elaboración propia.

El Sr. Mario Soliz puso en funcionamiento la bomba de ariete y se procedió con las mediciones de caudal de descarga a diferentes alturas. El conducto de descarga tenía un corte

a una distancia de 140 metros desde la bomba de ariete, lo que permitió realizar las dos primeras mediciones. Las restantes 3 mediciones se realizaron a 100 metros a partir de este punto de corte.

En cada uno de los cinco puntos se llevó a cabo el mismo procedimiento para la medición de la altura de elevación y el caudal de descarga. Con la ayuda de aplicaciones móviles, se determinó la altitud en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) de los puntos donde se realizaron las mediciones del tiempo necesario para llenar un recipiente de 10 litros, utilizado como volumen de referencia. En cada punto, se realizaron tres mediciones con el propósito de obtener un valor exacto del caudal de descarga. Con estos datos, se calculó el caudal de descarga.

Durante el proceso de medición del caudal de descarga y la altura de elevación, se llevó a cabo la observación y conteo de los golpes por minuto de la bomba de ariete. Utilizando un cronómetro digital, se inicia el conteo de golpes durante un intervalo de tiempo de un minuto.

De las dos primeras mediciones a 140 metros de la bomba de ariete se obtienen los resultados que se muestran en la tabla 15.



Figura N° 4. Mediciones a 140 m de distancia a la bomba de 4".
Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 2. Datos obtenidos de las mediciones en campo (140 m).

Cota	Altura respecto a la bomba (m)	Longitud respecto a la bomba (m)	Volumen (l)	Tiempo (seg)			Golpes por min
				Medición 1	Medición 2	Medición 3	
589	24.5	140	10	85	82	82	28
594.6	30.1	140	10	92	92	93	27

Fuente: Propia.

Para unir ambas mangueras se usó una unión universal de ¾". Los resultados obtenidos de las restantes 3 mediciones que se realizaron a una distancia de 240 metros de la bomba de ariete se muestran en la tabla 16.

Tabla N° 3. Datos obtenidos de las mediciones en campo (240m).

Cota	Altura respecto a la bomba (m)	Longitud respecto a la bomba (m)	Volumen (l)	Tiempo (seg)			Golpes por minuto
				Medición 1	Medición 2	Medición 3	
603.2	38,7	240	10	148	148	148	24
606.5	42,0	240	10	153	154	154	24
611.3	46,8	240	10	165	168	167	22

Fuente: Elaboración Propia.



Figura N° 5. Mediciones a 240 m de distancia a la bomba de 4".

Fuente: Propia.



Figura N° 6. Conteo de golpes por minuto.
Fuente: Propia.

Con el propósito de investigar la influencia de la variación en el peso de las válvulas de impulsión en el rendimiento del ariete hidráulico, se disminuyó el peso de las válvulas de impulso.

El Sr. Mario Soliz se encargó de reducir el peso de las válvulas de impulso con precaución, asegurándose de mantener la integridad estructural y funcional del equipo. Este proceso involucró la reducción de agregados utilizados para aumentar el peso de las válvulas. Se realizaron pruebas preliminares para garantizar que la reducción de peso no comprometiera la capacidad de cierre y apertura de las válvulas, lo que podría afectar negativamente el funcionamiento del ariete hidráulico.

Posteriormente, se repitió el procedimiento de medición de tiempos de llenado del recipiente de 10 litros y de golpes por minuto, en los mismos puntos donde se realizaron las mediciones iniciales. Esto se llevó a cabo para comparar los resultados obtenidos antes y después de la modificación en el peso de las válvulas. Los datos recopilados se presentan en la Tabla 17.

Tabla N° 4. Datos obtenidos de las mediciones en campo. Disminuyendo el peso de la válvula de impulso.

Cota	Altura respecto a la bomba (m)	Longitud respecto a la bomba (m)	Volumen (l)	Tiempo (seg)			Golpes por minuto
				Medición 1	Medición 2	Medición 3	
589	24,5	140	10	115	120	120	53
594,6	30,1	140	10	126	127	126	53
603,2	38,7	240	10	232	232	233	50
606,5	42,0	240	10	253	253	253	49
611,3	46,8	240	10	328	329	329	47

Fuente: Elaboración propia.