

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Ambiental



TESIS

“Evaluación de la eficiencia de la bomba de ariete hidráulico multipulsor en serie y paralelo utilizando resortes en las válvulas impulsoras”

Para obtener el título profesional de Ingeniero Sanitario

Elaborado por:

Rime Quero Juber Eduardo

 [0009-0002-6782-9457](https://orcid.org/0009-0002-6782-9457)

Asesor:

Ing. Roger Edmundo Salazar Gavelán

 [0009-0002-4663-4888](https://orcid.org/0009-0002-4663-4888)

LIMA – PERÚ

2023

Citar/How to cite	Rime Quero [1]
Referencia/Reference	[1] J. Rime Quero, " <i>Evaluación de la eficiencia de la bomba de ariete hidráulico multipulsor en serie y paralelo utilizando resortes en las válvulas impulsoras</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2023.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Rime, 2023)
Referencia/Reference	Rime, J. (2023). <i>Evaluación de la eficiencia de la bomba de ariete hidráulico multipulsor en serie y paralelo utilizando resortes en las válvulas impulsoras</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis queridos padres Hilario Rime y Luzmila Quero, por haber sido los inspiradores y motivadores para poder lograr esta meta en mi vida profesional. Por los valores fundamentales que me inculcaron y sus brillantes consejos que orientaron mis pasos para perseverar en mis sueños. A mis padres, que no tuvieron la oportunidad de acceder a una educación, mi mayor gratitud y admiración por siempre.

A mis hermanos Raúl Yanac, Yber Rime, Gilberto Rime, Alfonso Rime, Yovana Rime y Cintia Quero, por su apoyo incondicional, y por creer siempre en mí. Por sus sacrificios y sostén constante que han sido la clave de mi éxito.

A mi asesor Ing. Roger Salazar, por su dedicación y pasión por la enseñanza, y por guiarme en mi camino para poder concluir mi tesis. Por hacer entender que todo sueño es posible y que solo la educación crea puentes indestructibles.

A mis tíos Máximo Quero y Felicita Garay, por su humildad y paciencia. Poder contar con el apoyo de mis tíos, fue sin duda un privilegio.

AGRADECIMIENTO

Agradezco infinitamente a Dios, por haberme dado fuerzas y sabiduría para lograr este objetivo tan anhelado. Gracias por ser mi guía para afrontar la vida y superarme.

Al director del Laboratorio Nación de Hidráulica - UNI, Dr. Miguel Zubiaur, por haberme brindado su tiempo y paciencia para culminar el desarrollo de mi tesis.

A la Lic. Irma Alpaca, por brindarme su tiempo y motivación para poder avanzar, y culminar mi tesis en el Laboratorio Nacional de Hidráulica.

Al Sr. Carlos Farro y al Sr. Fredy Sánchez, por brindarme su tiempo y amabilidad durante el desarrollo de mi tesis. Su apoyo y presencia fueron importantes para culminar mi objetivo.

A mi amigo Ronaldo Lima, por haberme apoyado en el desarrollo de mi tesis.

Al Decano de la FIA, Dr. Mario Chávez, por ser el presidente de mi tesis.

Al Dr. Roberto O'Connor, por ser el Jurado especialista de mi tesis.

A la Lic. Karla Vera, por ayudarme en el trámite de sustentación de mi tesis.

A la Lic. Pamela Narvasta, por ayudarme en el trámite de sustentación de mi tesis.

Resumen

La presente investigación se llevó a cabo en el Laboratorio Nacional de Hidráulica de la UNI. El objetivo ha sido evaluar y determinar la mejor eficiencia de un prototipo de la bomba de ariete hidráulico multipulsor. Para ello se varió las carreras del resorte en 0.86 mm, se varió el número de válvulas impulsoras (trabajando con 1, 2 y 3 válvulas), se configuraron las válvulas impulsoras en serie y en paralelo, y se disminuyó el diámetro de la bomba de ariete de 1 1/2" a 1". Durante las pruebas para cada prototipo se cuantificaron el caudal de descarga y el caudal perdido. A partir de las pruebas desarrolladas, se observó que la carrera del resorte tiene una relación directa con la eficiencia hasta un punto óptimo, el número de válvulas impulsoras tiene una relación inversa con la eficiencia, la eficiencia de la bomba de ariete con 2 válvulas impulsoras en serie y con 2 válvulas impulsoras en paralelo son casi iguales, la eficiencia de la bomba de ariete con 3 válvulas impulsoras en paralelo es mayor que con 3 válvulas impulsoras en serie, y la reducción del diámetro de la bomba de ariete aumenta la eficiencia. Finalmente, en la investigación se determinó la mejor eficiencia, para una bomba de ariete de diámetro de 1", con 2 válvulas impulsoras en serie y carrera del resorte de 1.72 mm; la cual proporciona la eficiencia de 96.26%, con un caudal de descarga de 20.41 L/min y a una altura de descarga de 5 m.

Palabras clave – mejor eficiencia, carrera del resorte, numero de válvulas impulsoras, válvulas impulsoras en serie y en paralelo, diámetro de la bomba de ariete.

Abstract

This research was carried out at the UNI National Hydraulics Laboratory. The objective has been to evaluate and determine the best efficiency of a prototype of the hydraulic ram pump multipulser. To do this, the spring strokes were varied by 0.86 mm, the number of impeller valves was varied (working with 1, 2 and 3 valves), the impeller valves were configured in series and parallel, and the diameter of the pump was decreased from 1 1/2" to 1". During the tests for each in prototype, the discharge flow and the lost flow were quantified. Starting from the tests developed, it was observed that the spring stroke has a direct relationship with the efficiency up to an optimal point, the number of driving valves has an inverse relationship with the efficiency, the efficiency of the ram pump with 2 drivers valves in series and with 2 drivers valves in parallel are almost the same, the efficiency of the ram pump with 3 drivers valves in parallel is higher than what with 3 drivers valves in series, and the reduction of the diameter of the ram pump increases the efficiency. Finally, in the investigation, the best efficiency was determined for 1" ram diameter pump, with 2 impeller valves in series and a spring stroke of 1.72 mm; which provides an efficiency of 96.26%, with a discharge flow of 20.41 L/min and at a discharge height of 5 m.

Keywords – best efficiency, spring stroke, number of driving valves, driving valves in series and parallel, diameter of ram pump.

Tabla de Contenido

Resumen	III
Abstract	IV
Introducción	XVII
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1. Generalidades	1
1.1.1. Importancia de la investigación	1
1.2. Descripción del problema de investigación	1
1.2.1. Identificación del problema.....	1
1.2.2. Formulación del problema	2
1.2.3. Justificación del problema	2
1.3. Objetivos del estudio	3
1.3.1. Objetivo General	3
1.3.2. Objetivos Específicos	3
1.4. Antecedentes	4
1.5. Hipótesis	6
1.6. Variables	6
1.6.1. Variable dependiente	6
1.6.2. Variables independientes	6
1.7. Marco legal	7
Capítulo II. Marco teórico	8
1.8. Fenómeno del golpe de ariete	8
1.9. Causas que originan el fenómeno de golpe de ariete	9
1.10. Estudio matemático del fenómeno de golpe de ariete	12
1.10.1. Tiempo de cierre de la válvula.....	13
1.10.1.1. Cierre rápido	14
1.10.1.2. Cierre lento.....	14
1.10.1.2.1. Determinación del tipo de cierre.	15
1.11. Bomba de ariete hidráulico	19

1.12. Bomba de ariete hidráulico multipulsor	19
1.12.1. Componentes del sistema de una bomba de ariete hidráulico.....	20
1.12.2. Principio de funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico	26
1.13. Desarrollo de los modelos matemáticos de la bomba de ariete hidráulico	30
1.13.1. Modelos matemáticos existentes.....	30
1.13.2. Hipótesis general para todos los modelos	30
1.13.3. Modelo matemático de Krol.....	30
1.13.3.1. Teoría de Krol	31
1.13.4. Modelo matemático que define la eficiencia de la bomba de ariete hidráulico.	39
1.14. Dimensionamiento y criterios de diseño de los componentes de la bomba de ariete hidráulico	40
1.14.1. Tanque de alimentación	40
1.14.2. Caudal de alimentación.....	40
1.14.3. Diámetro de la tubería de alimentación	40
1.14.4. Longitud de tubería de alimentación.....	41
1.14.5. Altura de alimentación.....	42
1.14.6. Cuerpo del ariete.....	43
1.14.6.1. Cuerpo fabricado con tubería	44
1.14.6.2. Cuerpo unido mediante bridas.....	44
1.14.6.3. Cuerpo diseñado mediante fundición.	45
1.14.7. Válvula impulsora.....	45
1.14.7.1. Válvula impulsora regulada con resorte.....	46
1.14.7.1.1. Carrera del resorte para regular la válvula impulsora.	48
1.14.7.2. Válvula impulsora regulada con pesas.	48
1.14.7.2.1. Válvula impulsora con pesas encima.....	49
1.14.7.2.2. Válvula impulsora con pesas debajo.	49
1.14.7.3. Configuración de las válvulas impulsoras.....	50
1.14.7.3.1. Configuración de las válvulas impulsoras en serie.	50
1.14.7.3.2. Configuración de las válvulas de impulsoras en paralelo.....	51

1.14.7.4. Golpes por minuto de la válvula impulsora.....	52
1.14.7.5. Carrera de la válvula impulsora.....	53
1.14.7.6. Peso de la válvula impulsora.....	53
1.14.8. Válvula de descarga.....	54
1.14.9. Cámara de aire	54
1.14.9.1. Conservación y admisión de aire en la cámara de aire.	55
1.14.10. Tubería de descarga	55
1.14.11. Eficiencia de la bomba de ariete.....	56
1.14.11.1. La eficiencia de D' Aubuisson.....	58
1.14.11.2. La eficiencia de Rankine.	58
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	60
1.15. Diseño del prototipo de la bomba de ariete hidráulico	60
1.15.1. Altura de alimentación.....	60
1.15.2. Longitud de tubería de alimentación.....	60
1.15.3. Diámetro de la tubería de alimentación	61
1.15.4. Tanque de alimentación	61
1.15.5. Visor de nivel de agua.....	62
1.15.6. Angulo de inclinación	63
1.15.7. Diámetro de la bomba de ariete	64
1.15.8. Cámara de aire	65
1.15.9. Conservación de aire en la cámara de aire	66
1.15.10. Válvula de descarga.....	66
1.15.11. Válvula impulsora.....	67
1.15.12. Perno hexagonal	68
1.15.13. Resorte	69
1.15.14. Construcción de la bomba de ariete con diferentes configuraciones de las válvulas impulsoras.....	70
1.15.14.1. Construcción de la bomba de ariete convencional.....	70
1.15.14.2. Construcción de la bomba de ariete hidráulico multipulsor con válvulas impulsoras en serie.....	71

1.15.14.3. Construcción de la bomba de ariete hidráulico multipulsor con válvulas impulsoras en paralelo.....	72
1.15.15. Tubería de descarga	73
1.15.16. Longitud de la tubería de descarga	74
1.16. Procedimiento del desarrollo de las pruebas experimentales.....	75
1.17. Población y muestra	82
1.17.1. Población	82
1.17.2. Muestra	82
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados	83
1.18. Cálculo de la eficiencia esperada según las dimensiones de la bomba de ariete instalada en el LNH.....	83
1.18.1. Estimación del caudal de alimentación.....	84
1.18.2. Estimación del caudal de descarga	84
1.18.3. Cálculo de la eficiencia esperada	85
1.18.3.1. Cálculo de la eficiencia esperada con el caudal de alimentación mínima.	85
1.18.3.2. Cálculo de la eficiencia esperada con el caudal de alimentación máxima.	85
1.19. Resultados obtenidos en el LNH de la bomba de ariete hidráulico de diámetro de 1 1/2"	86
1.20. Resultados obtenidos en el LNH de la bomba de ariete hidráulico de diámetro de 1"	90
1.21. Análisis de los resultados de la eficiencia de los prototipos de la bomba de ariete hidráulico de diámetro de 1 1/2"	94
1.21.1. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" en relación con la carrera del resorte(sr).....	94
1.21.1.1. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 1 válvula impulsora.....	95
1.21.1.2. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 2 válvulas impulsoras en serie.....	96
1.21.1.3. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 3 válvulas Impulsoras en serie.....	98

1.21.1.4. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 2 válvulas impulsoras en paralelo.	99
1.21.1.5. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 3 válvulas impulsoras en paralelo.	101
1.21.2. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con relación al número de válvulas impulsoras.....	102
1.21.2.1. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 1 válvula Impulsora, 2 válvulas impulsoras en serie y 3 válvulas impulsoras en serie.....	102
1.21.2.2. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 1 válvula Impulsora, 2 válvulas impulsoras en paralelo y 3 válvulas impulsoras en paralelo.....	103
1.21.3. Análisis y comparación de los resultados de la eficiencia para la configuración de las válvulas impulsoras en serie respecto a la configuración de las válvulas impulsoras en paralelo para la bomba de ariete de 1 1/2"	104
1.21.3.1. Comparación de los resultados de la eficiencia para la configuración de 2 válvulas impulsoras en serie y 2 válvulas impulsoras en paralelo para la bomba de ariete de 1 1/2".....	104
1.21.3.2. Comparación de los resultados de la eficiencia para las configuraciones de 3 válvulas impulsoras en serie y 3 válvulas impulsoras en paralelo para la bomba de ariete de 1 1/2".....	106
1.21.4. Resumen de los resultados de la eficiencia de todos los prototipos de la bomba de ariete hidráulico de 1 1/2"	107
1.22. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de diámetro de 1"	108
1.22.1. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1" en relación con la carrera del resorte	108
1.22.1.1. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 1 válvula impulsora.....	109
1.22.1.2. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 2 válvulas impulsoras en serie.....	110
1.22.1.3. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 2 válvulas impulsoras en paralelo.	112

1.22.1.4. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 3 válvulas impulsoras en paralelo.	113
1.22.2. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de diámetro de 1" con relación al número de válvulas impulsoras	114
1.22.2.1. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 1 válvula Impulsora, 2 válvulas impulsoras en serie y 3 válvulas impulsoras en serie.....	115
1.22.2.2. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 1 válvula impulsora, 2 válvulas impulsoras en paralelo y 3 válvulas impulsoras en paralelo.	116
1.22.3. Análisis y comparación de los resultados de la eficiencia para la configuración de las válvulas impulsoras en serie respecto a la configuración de las válvulas impulsoras en paralelo para la bomba de ariete de 1"	117
1.22.3.1. Comparación de los resultados de la eficiencia para la configuración de 2 válvulas impulsoras en serie respecto a la configuración de 2 válvulas impulsoras en paralelo para la bomba de ariete de 1".....	117
1.22.3.2. Comparación de los resultados de la eficiencia para la configuración de 3 válvulas impulsoras en serie respecto a la configuración de 3 válvulas impulsoras en paralelo para la bomba de ariete de 1".....	118
1.22.4. Resumen de los resultados de la eficiencia de todos los prototipos de la bomba de ariete hidráulico de diámetro de 1".....	119
1.23. Análisis y comparación de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete hidráulico de diámetros de 1 1/2" y de 1"	120
1.23.1. Comparación de los resultados de la eficiencia para la bomba de ariete de diámetros de 1 1/2" y 1" con 1 válvula impulsora	121
1.23.2. Comparación de los resultados de la eficiencia para la bomba de ariete de diámetros de 1 1/2" y 1" con 2 válvulas impulsoras en serie	122
1.23.3. Comparación de los resultados de la eficiencia para la bomba de ariete de diámetros de 1 1/2" y 1" con 3 válvulas impulsoras en serie	123
1.23.4. Comparación de los resultados de la eficiencia para la bomba de ariete de diámetros de 1 1/2" y 1" con 2 válvula impulsora en paralelo	124
1.23.5. Comparación de los resultados de la eficiencia para la bomba de ariete de diámetros de 1 1/2" y 1" con 3 válvulas impulsoras en paralelo.....	125
1.24. Comparación de la eficiencia esperada respecto a la eficiencia obtenida en el laboratorio.....	126

1.25. Comparación de la eficiencia considerando el porcentaje de agua entregada.....	129
1.25.1. Eficiencias que se ajustan al rango considerado en la tabla de Pawlick.....	130
1.25.2. Eficiencias que no se ajustan al rango considerado en la tabla de Pawlick	131
1.26. Resumen de los resultados de la eficiencia de todos los prototipos de la bomba de ariete hidráulico de diámetros de 1 1/2" y 1"	133
1.27. Análisis del número de bombas de ariete para abastecer a una zona rural ...	134
Conclusiones	136
Recomendaciones	138
Referencias bibliográficas	140
Anexos.....	144

Índice de tablas

Tabla 1 Calculo de la altura de sobrepresión en una bomba de ariete para definir la clase de tubería	18
Tabla 2 Leyenda de los componentes del sistema de la bomba de ariete	26
Tabla 3 Longitud de la tubería de alimentación en función del diámetro de la tubería de alimentación (Galarza, 2013)	41
Tabla 4 Longitud de la tubería de alimentación en función de la altura de alimentación (Galarza, 2013).....	42
Tabla 5 Criterios de diseño de la cámara de aire (Galarza, 2013)	55
Tabla 6 Resumen de las dimensiones de la bomba de ariete instalada en el LNH	83
Tabla 7 Cantidades mínimas y máximas de caudal de alimentación de acuerdo con el diámetro de la tubería de alimentación (Silver, 1977)	84
Tabla 8 Caudal de descarga esperada según el diámetro de la tubería de descarga (Silver, 1977).	84
Tabla 9 Estimación de la eficiencia esperada máxima con las dimensiones instaladas en el LNH.	85
Tabla 10 Estimación de la eficiencia esperada mínima con las dimensiones instaladas en el LNH.	85
Tabla 11 Resultados de la bomba de ariete hidráulico de diámetro de 1 1/2" con 1 válvula impulsora.....	87
Tabla 12 Resultados de la bomba de ariete hidráulico multipulsor de diámetro de 1 1/2" con 2 válvulas impulsoras en serie	87

Tabla 13 Resultados de la bomba de ariete hidráulico multipulsor de diámetro de 1 1/2" con 3 válvulas impulsoras en serie	88
Tabla 14 Resultados de la bomba de ariete hidráulico multipulsor de diámetro de 1 1/2" con 2 válvulas impulsoras en paralelo	88
Tabla 15 Resultados de la bomba de ariete hidráulico multipulsor de diámetro de 1 1/2" con 3 válvulas impulsoras en paralelo	89
Tabla 16 Resultados de la bomba de ariete hidráulico de diámetro de 1" con 1 válvula impulsora.....	91
Tabla 17 Resultados de la bomba de ariete hidráulico multipulsor de diámetro de 1" con 2 válvulas impulsoras en serie	91
Tabla 18 Resultados de la bomba de ariete hidráulico multipulsor de diámetro de 1" con 3 válvulas impulsoras en serie	92
Tabla 19 Resultados de la bomba de ariete hidráulico multipulsor de diámetro de 1" con 2 válvulas impulsoras en paralelo	92
Tabla 20 Resultados de la bomba de ariete hidráulico multipulsor de diámetro de 1" con 3 válvulas impulsoras en paralelo	93
Tabla 21 Resultados de eficiencia esperada y eficiencias obtenidas en el laboratorio...126	
Tabla 22 Variación de la eficiencia respecto a la relación H/h (Tiago, 2002).	128
Tabla 23 Porcentaje de agua entregada (Pawlick et al., 2018)	129
Tabla 24 Eficiencias obtenidas en el laboratorio que están dentro del rango de eficiencia [50% – 65%]	130
Tabla 25 Eficiencias obtenidos en el laboratorio que son superiores al rango de eficiencia [50% – 65%]	131
Tabla 26 Eficiencias obtenidos en el laboratorio que son inferiores al rango de eficiencia [50% – 65%]	132
Índice de figuras	
Figura 1 Golpe de ariete en una línea de conducción por gravedad (Ortiz, 2006)	10
Figura 2 Comportamiento del fenómeno de golpe de ariete (Galarza, 2013)	11
Figura 3 Cierre rápido de una válvula (Galarza, 2013)	14
Figura 4 Esquema de sobrepresión en una línea de conducción originada por una bomba de ariete.....	17
Figura 5 Esquema de componentes del sistema de una bomba de ariete hidráulico.....	21
Figura 6 Esquema de fuente de alimentación al tanque elevado	22
Figura 7 Identificación de los componentes del sistema de la bomba de ariete instalado en el L.N.H parte 1.....	23
Figura 8 Identificación de los componentes del sistema de la bomba de ariete instalado en el L.N.H parte 2.....	24

Figura 9 Identificación de los componentes del sistema la bomba de ariete instalado en el L.N.H parte 3.	25
Figura 10 Esquema de funcionamiento de la fase 1 (Penagos, 2018).....	27
Figura 11 Esquema de funcionamiento de la fase 2 (Penagos, 2018).....	27
Figura 12 Esquema de funcionamiento de la fase 3 (Penagos, 2018).....	28
Figura 13 Esquema de funcionamiento de la fase 4 (Penagos, 2018).....	28
Figura 14 Esquema de funcionamiento de la fase 5 (Penagos, 2018).....	29
Figura 15 Esquema de funcionamiento de la fase 6 (Penagos, 2018).....	29
Figura 16 Comportamiento de la presión, velocidad, posición de la válvula impulsora y posición válvula de descarga durante los 7 periodos(Campaña & Guamán, 2011).....	38
Figura 17 Cuerpo fabricado con tubería metálica o plástico (Penagos, 2018).....	44
Figura 18 Cuerpo fabricado con tubería metálica o plástico (Penagos, 2018).....	45
Figura 19 Válvula impulsora regulada con resorte (Mota, 2014)	47
Figura 20 Válvula impulsora con resorte (Galarza, 2013).....	47
Figura 21 Válvula impulsora con pesas encima (Campaña & Guamán, 2011)	49
Figura 22 Válvula impulsora con pesas debajo (Campaña & Guamán, 2011).....	49
Figura 23 Bomba de ariete hidráulico multipulsor con válvulas impulsoras en serie (Bustamante & Quezada, 2009).....	51
Figura 24 Bomba de ariete hidráulico multipulsor con válvulas de impulsoras en paralelo (Galarza, 2013).....	52
Figura 25 Datos técnicos de la tubería de alimentación	61
Figura 26 Características técnicas del tanque de alimentación	62
Figura 27 Construcción y diseño del visor de nivel de agua	63
Figura 28 Codo de 14° fabricado manualmente mediante termofusión	64
Figura 29 Modelo de construcción de la bomba de ariete para diámetros de 1 1/2" y 1" ..	64
Figura 30 Datos técnicos para el diseño de la cámara de aire	65
Figura 31 Material para la conservación de aire en la cámara de aire.....	66
Figura 32 Detalles técnicos de la válvula check vertical.	67
Figura 33 Características técnicas de construcción de las válvulas impulsoras.	68
Figura 34 Especificaciones de diseño de las válvulas impulsoras.....	68
Figura 35 Especificaciones técnicas de los pernos, tuercas y arandelas.....	69
Figura 36 Diseño y especificaciones técnicas de los resortes	70
Figura 37 Diseño y construcción de la válvula impulsora para una bomba de ariete hidráulico convencional.....	71
Figura 38 Diseño y construcción de la bomba de ariete hidráulico multipulsor con 2 válvulas impulsoras en serie.....	71

Figura 39 Diseño y construcción de la bomba de ariete hidráulico multipulsor con 3 válvulas impulsoras en serie.....	72
Figura 40 Diseño y construcción de la bomba de ariete hidráulico multipulsor con 2 válvulas impulsoras en paralelo.....	73
Figura 41 Diseño y construcción de la bomba de ariete hidráulico multipulsor con 3 válvulas impulsoras en paralelo.....	73
Figura 42 Construcción y especificaciones técnicas de la línea de descarga.....	74
Figura 43 Colocación del perno hexagonal y fijación del resorte en el perno hexagonal.....	76
Figura 44 Interruptor manual para accionar el encendido y apagado de la bomba sumergible.....	76
Figura 45 Detalles técnicos de la bomba sumergible.....	77
Figura 46 Válvula esférica de 1 1/2" para cortar el flujo de alimentación a la bomba de ariete.....	78
Figura 47 Válvula compuerta para el control del nivel constante en el tanque de alimentación.....	79
Figura 48 Diseño y datos técnicos del manómetro.....	79
Figura 49 Recipiente graduado de 23 L para la medición del caudal de descarga.....	80
Figura 50 Captación del caudal perdido.....	81
Figura 51 Conducción del caudal perdido al punto de medición.....	81
Figura 52 Medición del caudal perdido con recipientes transparentes de 23 L y 12 L.....	82
Figura 53 Eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 1 válvula impulsora respecto a la carrea del resorte (Sr).....	95
Figura 54 Eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 2 válvulas impulsoras en serie respecto a la carrea del resorte (Sr).....	96
Figura 55 Eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 3 válvulas impulsoras en serie respecto a la carrea del resorte (Sr).....	98
Figura 56 Eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 2 válvulas impulsoras en paralelo respecto a la carrea del resorte (Sr).....	99
Figura 57 Eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 3 válvulas impulsoras en paralelo respecto a la carrea del resorte (Sr).....	101
Figura 58 Eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 1 válvula impulsora, 2 válvulas impulsoras en serie y 3 válvulas impulsoras en serie.....	102
Figura 59 Eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 1 válvula impulsora, 2 válvulas impulsoras en paralelo y 3 válvulas impulsoras en paralelo.....	103
Figura 60 Comparación de la eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 2 válvulas impulsoras en serie y 2 válvulas impulsoras en paralelo.....	104

Figura 61 Comparación de la eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 3 válvulas impulsoras en serie y 3 válvulas impulsoras en paralelo.....	106
Figura 62 Eficiencia de todos los prototipos de la bomba de ariete de diámetro de 1 1/2"	107
Figura 63 Eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 1 válvula impulsora respecto a la carrea del resorte (Sr).....	109
Figura 64 Eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 2 válvulas impulsoras en serie respecto a la carrea del resorte (Sr).....	110
Figura 65 Eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 3 válvulas impulsoras en serie respecto a la carrea del resorte (Sr).....	111
Figura 66 Eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 2 válvulas impulsoras en paralelo respecto a la carrera del resorte (Sr)	112
Figura 67 Eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 3 válvulas impulsoras en paralelo respecto a la carrera del resorte (Sr)	113
Figura 68 Eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 1 válvula impulsora, 2 válvulas impulsoras en serie y 3 válvulas impulsoras en serie.....	115
Figura 69 Eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 1 válvula impulsora, 2 válvulas impulsoras en paralelo y 3 válvulas impulsoras en paralelo.....	116
Figura 70 Comparación de la eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 2 válvulas impulsoras en serie y 2 válvulas impulsoras en paralelo.....	117
Figura 71 Comparación de la eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 3 válvulas impulsoras en serie y 3 válvulas impulsoras en paralelo.....	118
Figura 72 Eficiencia de todos los prototipos de la bomba de ariete de diámetro de 1" ..	119
Figura 73 Comparación de la eficiencia para la bomba de ariete de diámetros de 1 1/2" y 1" con 1 válvula impulsora	121
Figura 74 Comparación de la eficiencia para la bomba de ariete de diámetros de 1 1/2" y 1" con 2 válvula impulsoras en serie	122
Figura 75 Comparación de la eficiencia para la bomba de ariete de diámetros de 1 1/2" y 1" con 3 válvulas impulsoras en serie	123
Figura 76 Comparación de la eficiencia para la bomba de ariete de diámetros de 1 1/2" y 1" con 2 válvula impulsoras en paralelo	124
Figura 77 Comparación de la eficiencia de la bomba de ariete de diámetros de 1 1/2" y 1" con 3 válvula impulsoras en paralelo	125
Figura 78 Resumen de las máximas eficiencias de los prototipos de la bomba de ariete de diámetros de 1 1/2" y de 1"	133
Figura 79 Manual de diseño y construcción de la bomba de ariete hidráulico (Galarza, 2013)	144

Figura 80 Colocación de la bomba sumergible en la cisterna de 3.5 m de altura	145
Figura 81 Salida de la línea de impulsión de la cisterna.....	146
Figura 82 Línea de impulsión que alimenta al tanque elevado	147
Figura 83 Ubicación de la válvula compuerta de 1 1/2" en la línea de impulsión	147
Figura 84 Ubicación de la válvula esférica de 1 1/2" en la tubería de alimentación	148
Figura 85 Punto de ubicación de la reducción de 1 1/2" a 1" en la tubería de alimentación	148
Figura 86 Colocación de pelotas de tenis en la cámara de aire	149
Figura 87 Bomba de ariete funcionando con 1 válvula impulsora.....	149
Figura 88 Bomba de ariete funcionando con 2 válvula impulsoras en serie	150
Figura 89 Bomba de ariete funcionando con 3 válvulas impulsoras en serie.....	150
Figura 90 Bomba de ariete funcionando con 2 válvulas impulsoras en paralelo.....	151
Figura 91 Bomba de ariete funcionando con 3 válvulas impulsoras en paralelo.....	151
Figura 92 Colocación de la línea de descarga hasta una altura de 5 m	152
Figura 93 Medición del caudal de descarga	152
Figura 94 Medición del caudal perdido.....	153
Figura 95 Ajuste de las tuercas con llaves combinadas N° 17	153
Figura 96 Prototipo con la cual se obtuvo la mejor eficiencia	154
Figura 97 Adquisición de resortes de compresión (Av. Ramon Cárcamo 565, Lima....	154
Figura 98 Perforación de orificio con rosca interna en el tornero	155
Figura 99 Soldadura con plata de las válvulas impulsoras	155
Figura 100 Diámetros comerciales de los resortes.....	156
Figura 101 Diámetros comerciales de los resortes.....	156

Introducción

A lo largo de la historia, se ha venido mejorando el sistema de abastecimiento de agua, algunas por gravedad y otros por sistemas de bombeo, es así como en el año de 1796, se inventó la bomba de ariete hidráulico, una bomba que funciona gracias al fenómeno transitorio, llamado golpe de ariete, que a causa de la sobrepresión que genera, impulsa agua hasta una cierta altura. La bomba de ariete ha sido muy famosa durante décadas, hasta que fueron desplazadas por la aparición de bombas que funcionan con electricidad u otros combustibles. Pero en la actualidad están recobrando fuerza, ya que son muy útiles para bombear agua, sin consumir energía externa, y abastecer especialmente a zonas rurales para diferentes usos. También para zonas donde es escaso o es difícil el acceso a la energía eléctrica. Asimismo, esta bomba no contamina al medio ambiente.

Por la baja eficiencia que poseen, ya que dependen de la sobrepresión que tiene que generar el golpe de ariete, su competencia, por ejemplo, con las bombas de electricidad es baja, por esta razón se realiza esta investigación, con el objetivo de mejorar su eficiencia, y encontrar un prototipo de bomba de ariete con la mejor eficiencia. Para ello se realiza la variación de algunos parámetros, por ejemplo, la regulación de las válvulas impulsoras utilizando resortes; en un estudio realizado en Brasil por Mota (2014), también utilizó resorte en la válvula impulsora, pero no analizó la eficiencia, además trabajó con una sola válvula impulsora. Igualmente se realiza la variación del número de válvulas impulsoras, es decir, la bomba trabaja con más de una válvula impulsora, también llamada bomba de ariete hidráulico multipulsor; existe antecedentes de investigadores que realizaron este cambio, pero sin utilizar resortes, sino pesas. También se configura las válvulas impulsoras en serie y en paralelo, las cuales fueron recomendados por Galarza (2013). Asimismo, se reduce el diámetro de la bomba de ariete, manteniendo constante el diámetro de la tubería de alimentación; los investigadores Pizarro & Campoverde (2011) y

Otí (2017), también trabajaron con bombas, realizando este tipo de reducciones, pero sin precisar porqué este cambio podría mejorar la eficiencia.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1. Generalidades

1.1.1. *Importancia de la investigación*

La importancia de esta investigación es hacer conocer que existen equipos de bombeo, conocidas como bombas de ariete hidráulico, que impulsan agua de un nivel inferior a uno superior sin usar ningún tipo de energía artificial. También la importancia de esta tesis es promover la investigación, a la comunidad científica, para que sigan desarrollando estudios, en aras de buscar mejorar la eficiencia de la bomba de ariete hidráulico. Asimismo, es importante dar a conocer a la comunidad rural y urbana, que el funcionamiento de esta bomba es muy armonioso con la naturaleza. Además, son de fácil instalación. Materiales accesibles para su construcción. Operación y mantenimiento totalmente sencillos. Trabajan las 24 horas del día y 365 días del año, la cual garantiza una descarga de caudal de manera continua.

1.2. Descripción del problema de investigación

1.2.1. *Identificación del problema*

Las bombas que funcionan con energía eléctrica u otros tipos de combustibles impactan negativamente al medio ambiente; por otro lado, se tiene a la bomba de ariete que tiene un impacto positivo para el medio ambiente, ya que no requiere de ningún tipo de energía artificial para su funcionamiento.

La bomba de ariete hidráulico (brasileño “carneiro hidráulico”; inglés “hydraulic ram”; francés “béliet hydraulique”) fue inventado por el francés Joseph Michel Montgolfier en el año 1796. Estas bombas han venido siendo desplazadas por las bombas que funcionan con energía artificial, por ejemplo, las bombas centrífugas. Las bombas que utilizan energía artificial impulsan más caudal y a mayor altura, por ende, son más eficientes que las bombas de ariete hidráulico. Pero a pesar de poseer baja eficiencia, estas bombas de ariete hidráulico son utilizados, en países que tienen bajo poder adquisitivo. Por ejemplo, países como Colombia, Ecuador, Brasil, China y Nepal utilizan esta bomba ecológica.

1.2.2. *Formulación del problema*

El problema que tiene la bomba de ariete hidráulico es su baja eficiencia. Pero aun con esas limitaciones, estas bombas ecológicas son muy confiables, ya que se han realizado investigaciones, diseños y proyectos, donde su funcionamiento a resultado ser óptimo; satisfaciendo necesidades de abastecimiento de agua a los pobladores de zonas urbanas, y más de las zonas rurales. Haciendo una visión del futuro, cuando se agoten las energías artificiales, estas bombas volverán a ser muy útiles. Por lo tanto, en la presente tesis se plantea el siguiente problema: ¿Cuál es la mejor eficiencia de un prototipo de la bomba de ariete hidráulico multipulsor en serie y paralelo utilizando resortes en las válvulas impulsoras?

1.2.3. *Justificación del problema*

En la actualidad se observa la necesidad de disponer con otros tipos de bombas para poder impulsar agua, desde un nivel inferior hacia un nivel superior, sin utilizar energía eléctrica u otro tipo de combustible, ya que existe zonas donde la población no dispone de energía eléctrica. Además, hay comunidades que no disponen con suficiente economía para instalar, operar y mantener bombas que funcionan con energía eléctrica u otros

combustibles. Asimismo, hay zonas donde la geografía no es accesible para el montaje de bombas que funcionan con energía eléctrica u otros combustibles. La bomba de ariete hidráulico multipulsor en serie y paralelo utilizando resortes en las válvulas impulsoras es una alternativa para bombear agua, ya que se ajusta a las necesidades técnicas y económicas, por ejemplo, de una población rural. Además, se adapta a las condiciones geográficas de una zona rural.

1.3. Objetivos del estudio

1.3.1. Objetivo General

- Evaluar y determinar la mejor eficiencia de un prototipo de la bomba de ariete hidráulico multipulsor en serie y paralelo utilizando resortes en las válvulas impulsoras.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Evaluar y determinar la relación que existe entre la carrera del resorte y la eficiencia.
- Determinar la relación que existe entre el número de válvulas impulsoras y la eficiencia.
- Comparar la eficiencia de las configuraciones de las válvulas impulsoras en serie y en paralelo.
- Evaluar y determinar la relación que existe entre el diámetro de la bomba de ariete y la eficiencia.

1.4. Antecedentes

Los antecedentes como referencias fundamentales en la elaboración de la presente investigación son las tesis de investigación recientes que abarcan desde diferentes perspectivas el estudio de la eficiencia de la bomba de ariete hidráulico, las mismas que se describen a continuación:

En el año 2019, la tesis de investigación: “Evaluación de la eficiencia de la bomba de ariete hidráulico multi-impulsor utilizando botellas de plástico en la cámara de aire” (Jiménez, 2019). En dicha tesis el autor determinó la máxima eficiencia haciendo variaciones de los siguientes parámetros: número de válvulas de impulsión, longitud de la tubería de alimentación y volumen de la cámara de aire. En las pruebas, para distintas configuraciones de la bomba de ariete, midió el caudal de bombeo, presión de salida, caudal perdido y número de pulsaciones. El tesista trabajó con una altura de alimentación de 1.70 m. El investigador determinó que la máxima eficiencia ocurre cuando: la cámara de aire tiene un volumen de 600 mL, longitud de tubería de alimentación de 7.5 m y 2 válvulas de impulsión en serie. La eficiencia que determinó para esa configuración ha sido de 74.79%, con un caudal de bombeo de 2.66 L/min y una presión de salida de 5.49 mca.

En el año 2016, la tesis de investigación: “Eficiencia de un sistema de suministro de agua por impulsión utilizando bombas de ariete hidráulico con válvulas en serie y en paralelo” (Malca & Quiroz, 2016). En esta investigación los tesistas compararon la eficiencia, haciendo diferentes configuraciones de la bomba de ariete hidráulico: uno con 2 válvulas de impulsión en serie y el otro con 2 válvulas de impulsión en paralelo. En el laboratorio realizaron 9 pruebas para cada escenario. Mantuvieron la altura de alimentación constante de 1.80 m. Utilizaron tres caudales de alimentación: 4.52 L/s, 4.11 L/s y 3.67 L/s. Trabajaron con tres alturas de descarga: 2.35 m, 2.80 m, 3.25 m. Para cada altura de descarga, cuantificaron el caudal de descarga mediante el método volumétrico. Los tesistas

concluyeron que la bomba de ariete hidráulico con 2 válvulas de impulsión en serie era el más eficiente. Obteniendo una eficiencia máxima de 3.8% con 2 válvulas impulsoras en serie, y un caudal de descarga de 5.7 L/min; asimismo encontraron una eficiencia máxima de 3.38% para 2 válvulas impulsoras en paralelo, y con un caudal de descarga de 5.1 L/min.

En el año 2014, la tesis de investigación: "Proyecto de carneiro hidráulico com integração de energia eléctrica proveniente de fonte renovável" (Mota, 2014). En esta investigación el tesista busco una bomba de ariete que tenga un funcionamiento automático. Utilizo un diámetro de 1" para la tubería de alimentación, y un diámetro de 3/4" para la línea de descarga. El tesista probó tres prototipos. En el primer prototipo utilizo la cámara de aire de PVC, y como válvula impulsora, un check vertical; cambio la posición del resorte, en la parte superior de la placa para conseguir el cierre de la válvula impulsora. Durante las pruebas el autor observo que la bomba funcionó hasta cierto momento, detecto que la cámara de aire se llenó completamente con agua. En el segundo prototipo coloco una botella de plástico como cámara de aire, pero observo que ahora el problema era la válvula impulsora, ya que no podía regularlo. En el tercer prototipo cambio la válvula impulsora, instalando una válvula de pie con canastilla. Para regularla instalo un tornillo, con la intención de colocar pesas, mediante tuercas, pero una tuerca no era suficiente para reabrir la válvula, luego coloco una pesa mayor, pero ya tenía sobrepeso, notando que en la práctica era difícil y lento encontrar un peso ideal. Por ello el tesista implemento un resorte, e hizo que actúe directamente en la placa de la válvula, y este siga su desplazamiento mientras se comprima y se descomprima. El tesista encontró que, para una carrera del resorte de 5 mm, altura de alimentación de 1.87 m y altura de descarga de 3.30 m; la bomba de ariete logro impulsar un caudal máximo de 5.17 L/min.

En el año 2013, la tesis de investigación: "Estudio de factores hidráulicos en una bomba de ariete hidráulico y su efecto sobre la eficiencia" (Galarza, 2013). En esta tesis el investigador hizo un análisis teórico con un Software, de los parámetros que impactan en

la eficiencia de la bomba de ariete, con el fin de encontrar la configuración con la mayor eficiencia. El tesista verificó que, la bomba de ariete con tres válvulas de impulsión en serie era el más eficiente. Llevando luego a evaluar, ese prototipo, experimentalmente. Para las pruebas utilizó tres carreras de las válvulas de impulsión: 3 mm, 5 mm y 10 mm. También utilizó contrapesos de 0.6 kg y 1.6 kg. Finalmente, en la investigación concluyó que, si se requiere de grandes caudales de descarga: la configuración con 3 válvulas de impulsión en serie, carrera de 10 mm y contrapeso de 0.6 kg es la mejor opción; ya que obtuvo una eficiencia de 28.57 %, con un caudal de bombeo de 8 L/min, y a una altura de descarga de 2.5 m. Sin embargo, si se requiere impulsar agua a una mayor altura de descarga, la configuración con 3 válvulas impulsoras en serie, carrera de 10 mm y contrapeso de 1.6 kg, es la indicada; ya que obtuvo una eficiencia de 22.86%, con un caudal de bombeo de 1 L/min, y a una altura de descarga de 32 m.

1.5. Hipótesis

La mejor eficiencia de un prototipo de la bomba de ariete hidráulico multipulsor en serie y paralelo utilizando resortes en las válvulas impulsoras es de 67.20%.

1.6. Variables

1.6.1. Variable dependiente

- Eficiencia de la bomba de ariete

1.6.2. Variables independientes

Las variables independientes son los siguientes parámetros:

- Carrera del resorte
- Número de válvulas impulsoras
- Configuración de las válvulas impulsoras en serie y en paralelo
- Diámetro de la bomba de ariete

1.7. Marco legal

La presente tesis se basó en estándares de diseño de la DTU (Unidad de Desarrollo de Tecnología). La construcción de la bomba de ariete hidráulico cumple las especificaciones técnicas, de dicho manual de diseño y construcción. Estos diseños y especificaciones se tomaron en cuenta del Programa de Bomba de Ariete Hidráulico. El marco legal se desarrolla según: Ram pump system desing notes (Notas para el diseño de bombas de ariete). Ver Anexo 1.

Capítulo II. Marco teórico

1.8. Fenómeno del golpe de ariete

A lo largo de la carrera se ha estudiado el golpe de ariete en diferentes materias. Se ha estudiado el comportamiento del fenómeno, cálculo de la altura de sobrepresión y depresión. Asimismo, sobre como contrarrestarlo, y mitigarlo mediante la selección y uso de dispositivos de control. Siempre se escuchó, que los efectos de este fenómeno son perjudiciales, y disminuyen drásticamente la vida útil de los componentes hidráulicos. Sin embargo, existe otra perspectiva más positiva en la que se puede aprovechar este fenómeno, que es para bombear agua, con una bomba llamada ariete hidráulico, que aprovecha la sobrepresión generada por el golpe de ariete (Lofrío, 2020).

Al resultado de la transformación repentina de energía cinética a energía de presión se le conoce como golpe de ariete (Ayala, 2006).

Este fenómeno ocurre cuando hay un cambio repentino del flujo, pasando de un flujo en operación normal a un flujo llamado transitorio hidráulico, donde el flujo se comporta como un flujo no permanente, generándose sobrepresiones y depresiones.

En el acontecimiento de este fenómeno, se tiene que dejar de lado las dos hipótesis normalmente empleadas en la mecánica de fluidos: fluido incomprensible y régimen permanente. El fenómeno de golpe de ariete es un fenómeno de flujo transitorio, por lo tanto, es de régimen variable, donde la tubería ya no es rígida y el líquido ya no es incomprensible, es decir, ambos pueden sufrir una deformación (Galarza, 2013).

También se le puede definir como el cambio brusco de energía cinética a energía de presión. Se puede considerar, a este fenómeno, como la oscilación de ondas de presión de gran intensidad. Originado al momento de dar inicio o interrumpir el funcionamiento de una tubería de agua a presión. Esas ondas crecen y decrecen en un periodo de tiempo, generando sobrepresiones y depresiones, hasta que la tubería absorba todas esas sobrepresiones, y después volver a estabilizarse (Ortiz, 2006).

En la actualidad hay programas de ingeniería avanzada para hacer modelamientos del fenómeno de golpe de ariete, específicamente el estudio del fenómeno de transitorio hidráulico. Con esos programas se puede modelar, las tuberías que operan a presión, ya sea por gravedad o por impulsión. Para lo cual al modelo se ingresa: propiedades del agua, propiedades del material de la tubería y parámetros hidráulicos. Con un adecuado criterio de selección de dispositivos de control, el transitorio hidráulico se puede prevenir fácilmente, y mitigar así las consecuencias del golpe de ariete, protegiendo a la tubería de diversas fallas.

1.9. Causas que originan el fenómeno de golpe de ariete

Las causas más comunes para que ocurra el fenómeno de golpe de ariete son: cuando se acciona el cierre de una válvula, apertura de una válvula, y la parada repentina de una bomba en un sistema de bombeo.

Figura 1

Golpe de ariete en una línea de conducción por gravedad (Ortiz, 2006)

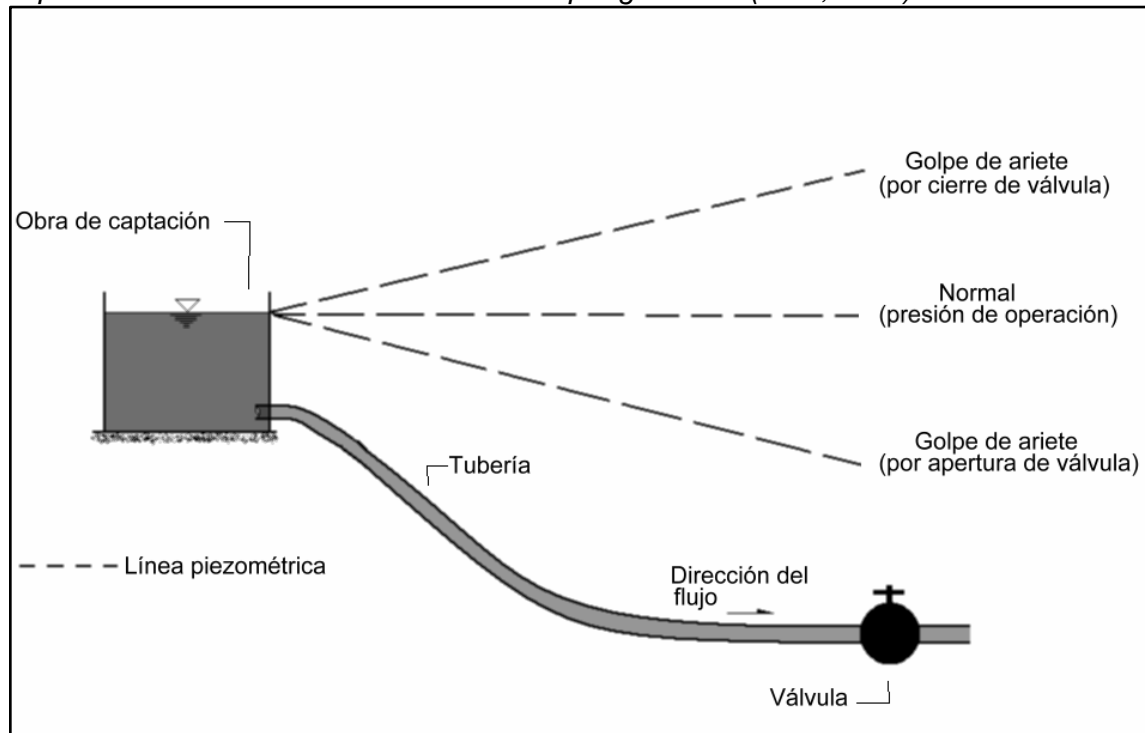
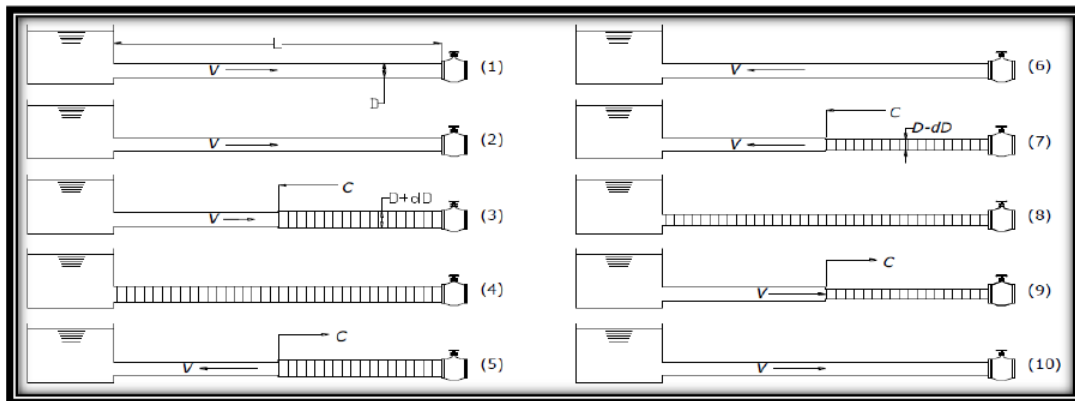


Figura 2

Comportamiento del fenómeno de golpe de ariete (Galarza, 2013)



En la figura 2 se puede observar a la onda de presión, generada por el cierre de una válvula, la cual oscila ocasionando la dilatación y compresión de la tubería, hasta que este regrese a su estado inicial.

Durante el transitorio hidráulico, el líquido se mueve a lo largo de la tubería, con una magnitud de velocidad, similar a la de onda sonora, en un medio que es el agua. A causa de esta sobrepresión que se origina, el conducto se dilata y el flujo se comprime, retornando ambos por elasticidad al estado inicial. Este efecto es cíclico, generándose un movimiento de presión oscilatorio, cada vez con menor magnitud e intensidad hasta su anulación (Campaña & Guamán, 2011).

C es la velocidad de la onda de presión, también llamado celeridad, L es la longitud de la tubería. El tiempo que demora en recorrer, la onda de presión, por primera vez, desde la válvula hasta el tanque es: $t_0 = \frac{L}{C}$, y el periodo del ciclo, considerando la sobrepresión y la depresión es: $T = 4 * t_0$ (Galarza, 2013).

1.10. Estudio matemático del fenómeno de golpe de ariete

El cambio de velocidad, debido al cierre repentino de la válvula impulsora, se transmite a lo largo de la tubería, a través del agua, en forma de onda de presión. Esta onda de presión recorre la tubería en ambos sentidos, hasta que la fricción provocada entre el agua y la tubería, y la fricción resultante de su deformación elástica, la neutralice. La velocidad de propagación de la onda de choque, también denominado celeridad(c), se puede calcular en forma general con la siguiente expresión (Mota, 2014).

$$c = \frac{9900}{\sqrt{\left(48.3 + k \cdot \frac{D}{e}\right)}} \quad \text{Ecuación 1}$$

c: velocidad de la onda(m/s).

D: diámetro interior de la tubería(m).

e: espesor del tubo(m).

k: coeficiente de elasticidad del material de la tubería.

k = 0.5 para acero.

k = 1 para hierro fundido.

k = 33.3 para PVC.

Ecuación de Bernoulli Generalizada

Esta ecuación muestra la conservación de la energía. También se le conoce como ecuación general de la energía. Esta ecuación indica que, si uno de los componentes de la energía disminuye, el otro componente aumentara o viceversa (Mataix, 1986).

$$\frac{P_1}{\rho g} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} - \sum H_{r1-2} + \sum H_b - \sum H_t = \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad \text{Ecuación 2}$$

$\frac{P}{\rho g}$: altura de presión.

Z: altura geodésica o altura de posición.

$\frac{V_1^2}{2g}$: altura de velocidad.

$\sum H_{r1-2}$: suma total de pérdidas hidráulicas.

$\sum H_b$: suma de los incrementos de las alturas proporcionados por bombas.

$\sum H_t$: suma de los incrementos de altura absorbida por los motores(turbinas).

En la ecuación 1 los componentes de energía están representados por su equivalente en altura.

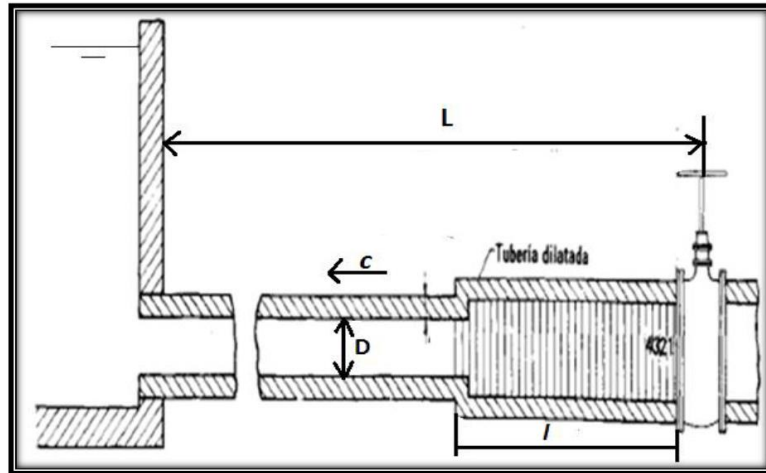
1.10.1. Tiempo de cierre de la válvula

El tiempo de cierre de la válvula es un factor muy importante. Si el cierre es rápido, la válvula quedara totalmente cerrada antes que ocurra la depresión; por el contrario, si la válvula se cierra lentamente, habrá tiempo para que ocurra la depresión antes que la válvula se cierre totalmente (Ayala, 2006).

1.10.1.1. Cierre rápido

Figura 3

Cierre rápido de una válvula (Galarza, 2013).



A causa del cierre rápido de una válvula, ocurre lo siguiente: por conservación de la energía, la energía cinética que disminuye se transforma en energía de presión, generando una sobrepresión, la cual hace que la tubería empiece a dilatarse hacia la izquierda, tal como se muestra en la figura 3.

Durante el cierre rápido, la onda de presión no tiene tiempo de llegar al tanque, reflejarse y regresar a la válvula, antes de que se complete la mitad del ciclo (Mataix, 1986).

1.10.1.2. Cierre lento.

En el cierre lento, el aumento de presión es menor que, si el flujo en la tubería se interrumpiera rápidamente, ya que la onda de presión vuelve al punto de partida antes de que se complete el cierre (Ayala, 2006).

1.10.1.2.1. **Determinación del tipo de cierre.**

Para definir si el cierre es rápido o lento, primero se calcula el tiempo de propagación de la onda de presión durante la sobrepresión(T/2), la cual se expresa mediante la siguiente ecuación.

$$t = 2*t_0 = \frac{2L_A}{c} \quad \text{Ecuación 3}$$

t: tiempo de propagación de la onda durante la sobrepresión(s).

t₀ : cuarto de periodo(s).

L_A: longitud de la tubería(m).

c: celeridad de la onda(m/s).

Se dice que una maniobra es rápida, si el tiempo de cierre de la válvula(t₁) es menor que t (t₁ < t), de lo contrario el cierre es lento (t₁ ≥ t). Así según la fórmula de Allievi o Frizell – Joukowsky, la expresión utilizada en el análisis de la sobrepresión generada por el golpe de ariete, en caso de que la válvula tenga una maniobra de cierre rápido es:

$$\Delta P_{GA} = \frac{c * V_{media}}{g} \quad \text{Ecuación 4}$$

ΔP_{GA}: sobrepresión generada por el golpe (m).

V_{media}: velocidad media de agua(m/s).

c: velocidad de la onda(m/s).

g: aceleración de la gravedad(m/s²).

Por otro lado, según Michaud, si la válvula tiene una maniobra de cierre lenta, la sobrepresión viene dado por:

$$\Delta P_{GA} = \frac{2L_A * v_{media}}{g * t_1} \quad \text{Ecuación 5}$$

ΔP_{GA} : sobrepresión generada (m).

L_A : longitud de la tubería de alimentación(m).

v_{media} : velocidad media de agua(m/s).

g : aceleración de la gravedad(m/s^2).

t_1 : tiempo de cierre de la válvula(s).

Al analizar estas ecuaciones se puede observar que el cierre de la válvula debe ser lo más rápido posible, así como la velocidad de agua, para producir una mayor sobrepresión (Mota, 2014).

Figura 4

Esquema de sobrepresión en una línea de conducción originada por una bomba de ariete.

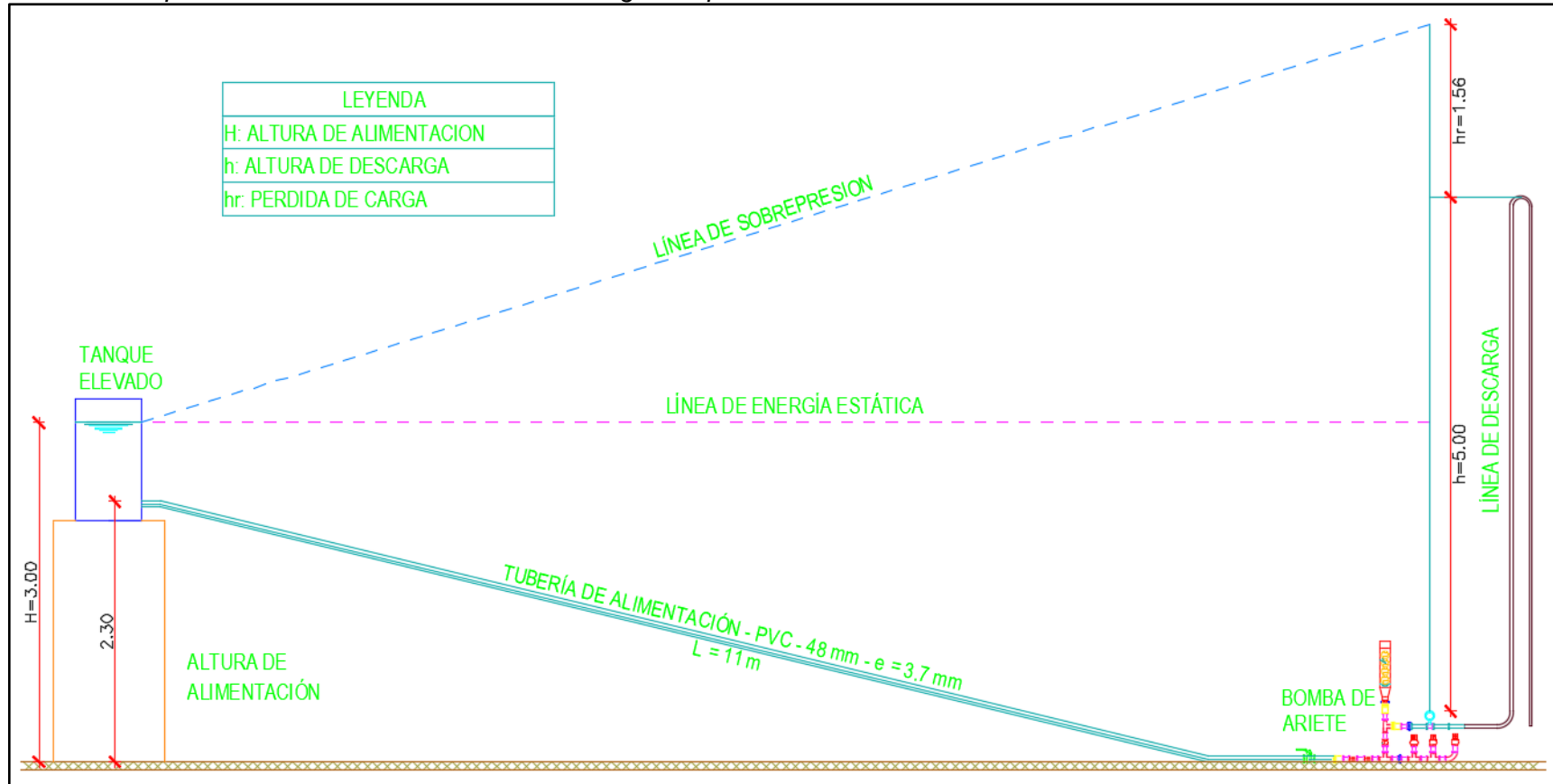


Tabla 1

Cálculo de la altura de sobrepresión en una bomba de ariete para definir la clase de tubería.

Parámetro	Criterio	Resultado	Unidades
Longitud de la tubería(L)	$500 \leq L/D \leq 1000$	11	m
Coefficiente de elasticidad de la tubería(K)	De tablas (PVC)	33.3	adi.
Espesor de la tubería(e)	e	0.0037	m
Diámetro interno de la tubería de alimentación (Di)	$Di = D - 2*e$	0.0406	m
Área interna de la tubería (Ai)	$Ai = \pi/4*(Di^2)$	0.00129	m ²
Celeridad de la onda(c)	$c = 9900/\sqrt{(48.3 + K*(Di/e))}$	486.735	m/s
Caudal de Alimentación (Qa)	$Qa = Qp + q$	0.002124	m ³ /s
Velocidad media (Vm)	$Vm = Qa/Ai$	1.647	m/s
Tiempo durante la sobrepresión(T/2)	$T/2 = (2*L)/c$	0.045	s
Tiempo de cierre de la válvula impulsora(t)	Determinado con la oscilación de las agujas del manómetro	0.633	s
Cierre rápido			
Altura de sobrepresión - Allievi([ΔH])	$[\Delta H]=Vm*c/g$	81.72	m
Cierre lento			
Altura de sobrepresión - Michaud[ΔH]	$[\Delta H]=(2*L*Vm)/(g*t)$	5.84	m

Como se puede observar en la tabla 1, el tiempo de cierre de la válvula impulsora para una bomba de ariete con 3 válvulas impulsoras en serie, es mayor al tiempo durante la ocurrencia de la sobrepresión, razón por la cual el cierre es lento.

Considerando el caso más desfavorable, es decir, si el cierre es rápido; de acuerdo con la sobrepresión calculada en la tabla 1, la clase de tubería mínima a colocar es de clase 10. En la investigación se ha colocado una tubería de PVC con rosca de clase 10,

razón por la cual cumple con la clase de la tubería recomendada para soportar la sobrepresión máxima generada por el golpe de ariete.

1.11. Bomba de ariete hidráulico

En términos generales una bomba de ariete hidráulico es una bomba que impulsa agua desde un nivel inferior a un nivel superior, sin la necesidad de contar con energía eléctrica u otro tipo de combustible, ya que esto lo realiza gracias al fenómeno llamado golpe de ariete. Esta bomba emplea la energía cinética de una columna de agua para después elevar y descargar una porción de esta. Las fuentes de abastecimiento para el funcionamiento de una bomba de ariete pueden ser un río, canal y acequias (Galarza, 2013).

1.12. Bomba de ariete hidráulico multipulsor

Desde tiempos remotos se ha venido mejorando la eficiencia de los prototipos de la bomba de ariete hidráulico. Los arietes convencionales utilizan una sola válvula impulsora. Las bombas de ariete hidráulico multipulsor son las que usan más de una válvula impulsora, es decir, a partir de 2 válvulas impulsoras. Estas válvulas impulsoras pueden configurarse en paralelo y en serie.

Países como Ecuador y España han realizado estudios encaminados hacia la configuración de nuevos prototipos de bomba de ariete hidráulico, como es el caso de la bomba de ariete hidráulico multipulsor, que consiste en modificar la configuración de las válvulas impulsoras, reemplazando la única válvula impulsora, por más de 1 válvula impulsora. En el ariete multipulsor se aprovecha mejor el caudal adicional, que generalmente se desperdicia en un ariete convencional, obteniendo así una mayor eficiencia (Galarza, 2013).

El aumento de válvulas impulsoras hace que el nuevo diseño tenga más ventaja de prevenir los principales inconvenientes que tiene el ariete convencional, que son: el enorme peso de la bomba, fuentes con grandes caudales de agua para su funcionamiento, y por ende menor eficiencia (Bustamante & Quezada, 2009).

1.12.1. Componentes del sistema de una bomba de ariete hidráulico

El esquema de componentes de la bomba de ariete, que se instalaron en el LNH se puede observar en la Figura 5, asimismo los componentes reales, se muestran en la figura 7, figura 8 y figura 9.

Figura 5

Esquema de componentes del sistema de una bomba de ariete hidráulico.

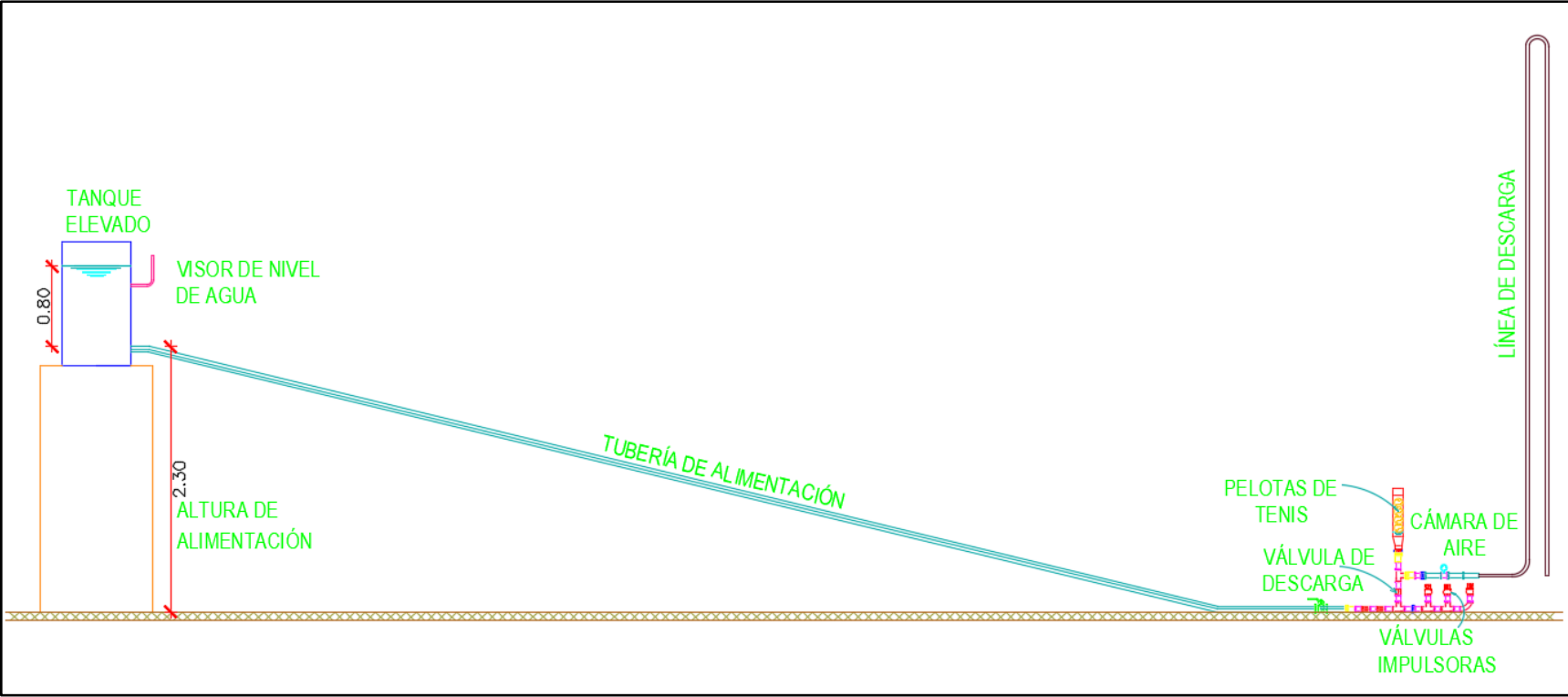


Figura 6

Esquema de fuente de alimentación al tanque elevado.

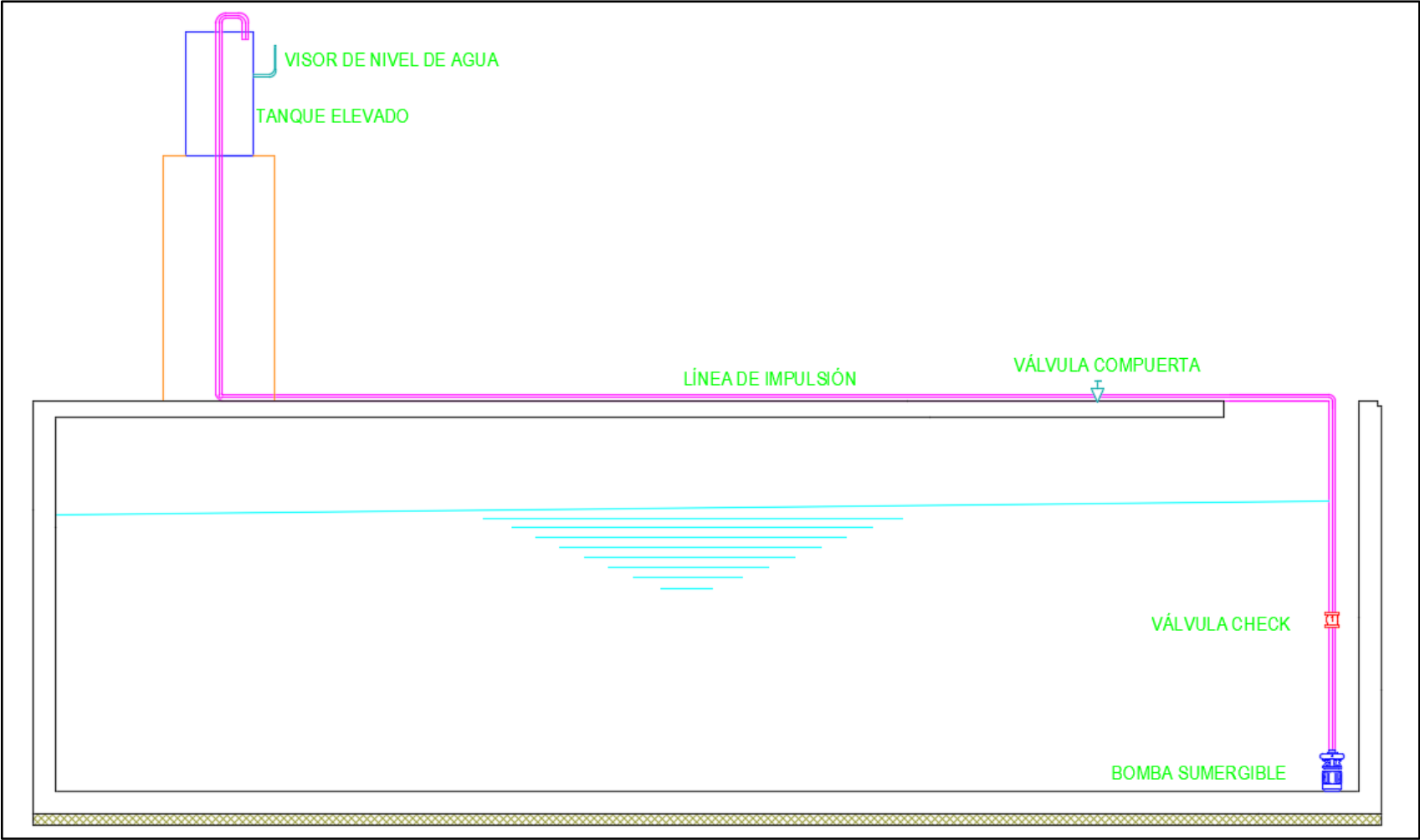


Figura 7

Identificación de los componentes del sistema de la bomba de ariete instalado en el L.N.H parte 1.



Figura 8

Identificación de los componentes del sistema de la bomba de ariete instalado en el L.N.H parte 2.

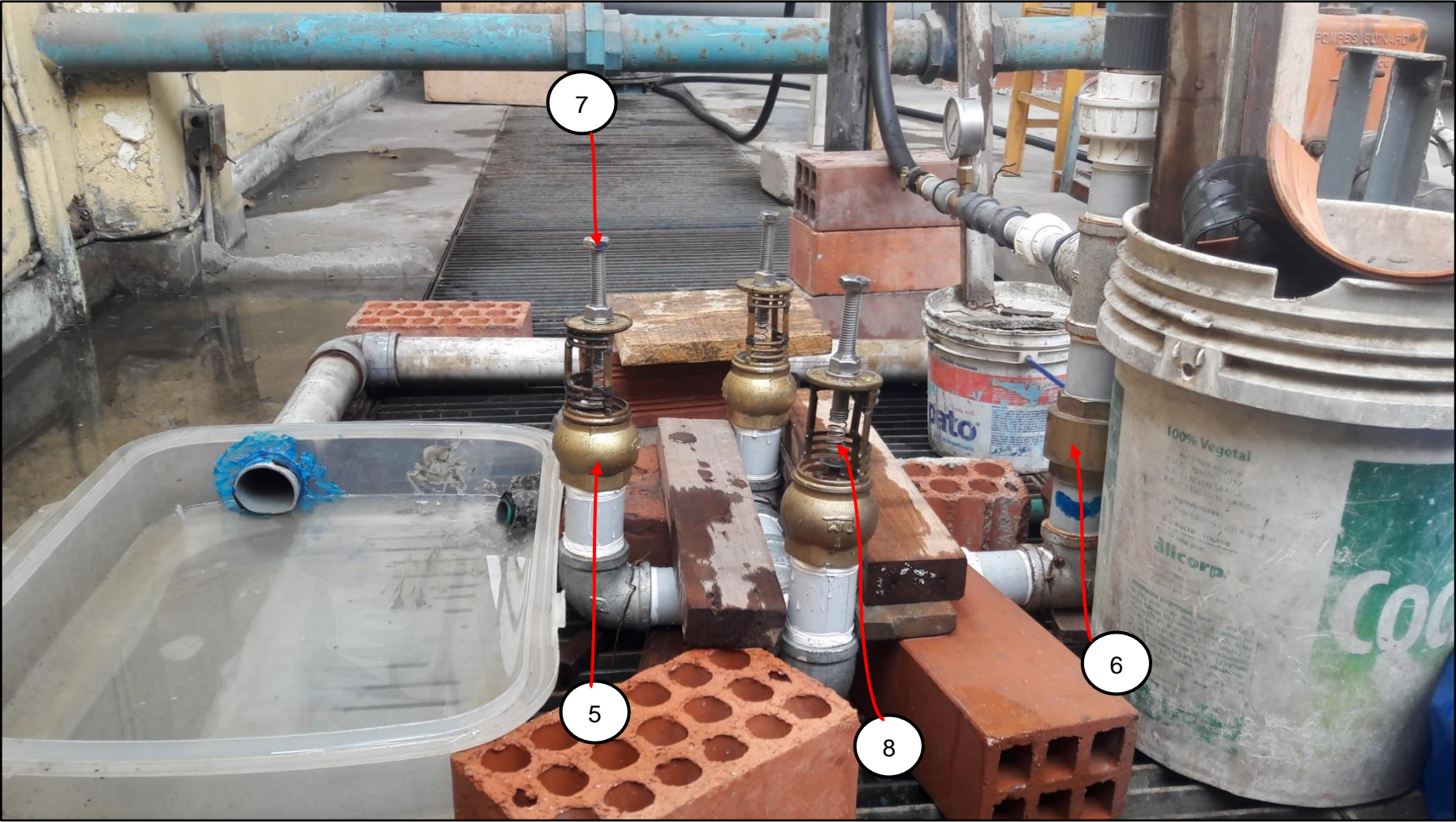


Figura 9

Identificación de los componentes del sistema la bomba de ariete instalado en el L.N.H parte 3.

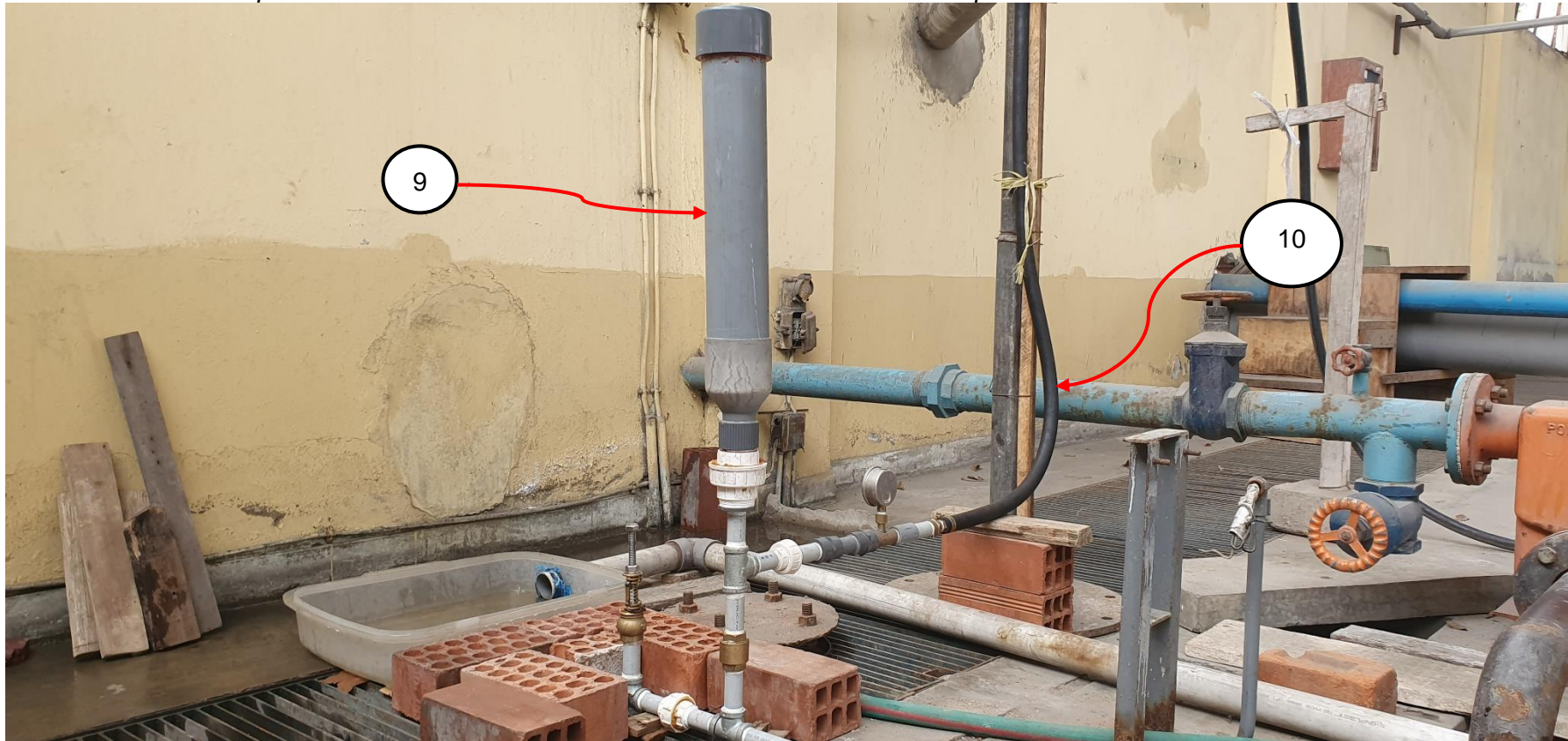


Tabla 2

Leyenda de los componentes del sistema de la bomba de ariete.

1	Altura de alimentación
2	Tubería de alimentación
3	Tanque elevado
4	Visor de nivel de agua
5	Válvula impulsora
6	Válvula de descarga
7	Perno hexagonal
8	Resorte
9	Cámara de aire
10	Línea de descarga

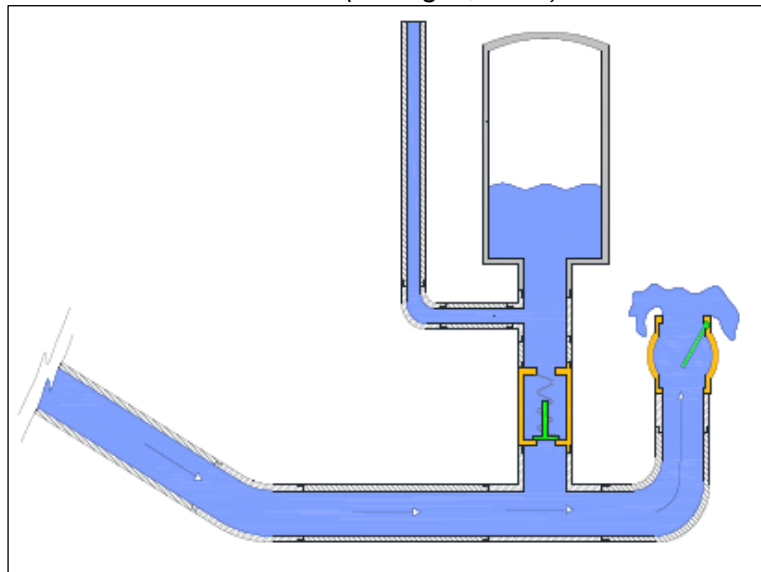
1.12.2. Principio de funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico

Según Penagos (2018), las fases de funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico son la siguiente:

Fase 1. El agua desciende por la tubería de alimentación, desde el tanque de alimentación, ya que hay un desnivel entre el eje horizontal de las válvulas impulsoras y el nivel de agua en el tanque. El flujo desciende hasta el cuerpo de la bomba de ariete hidráulico, y emerge por la válvula impulsora hacia la atmosfera.

Figura 10

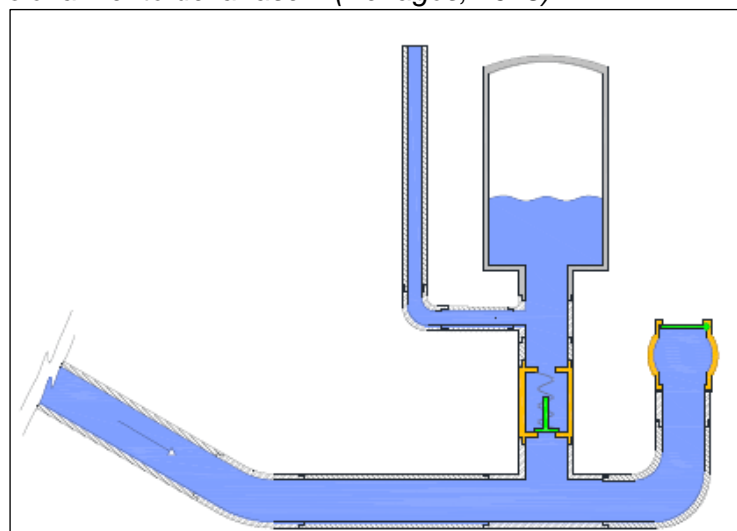
Esquema de funcionamiento de la fase 1 (Penagos, 2018).



Fase 2. A medida que el agua emerge por la válvula impulsora, el flujo genera cierta presión a la placa horizontal de la válvula impulsora, hasta que esa presión sea suficiente para que la válvula impulsora se cierre, ya que inicialmente está abierta.

Figura 11

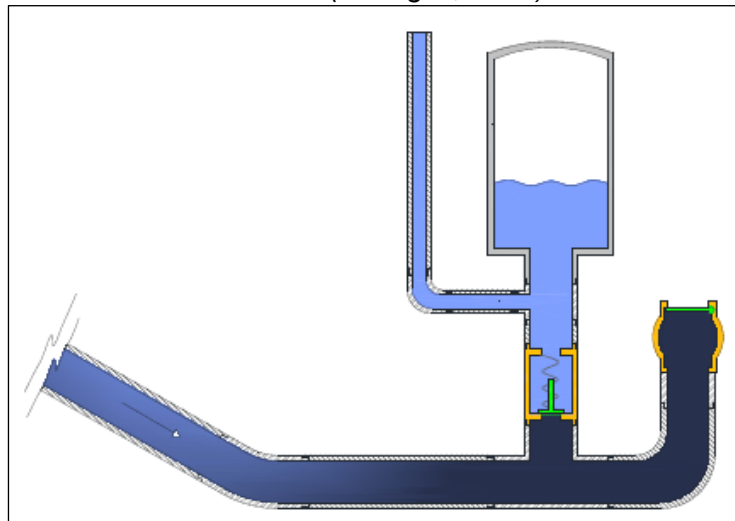
Esquema de funcionamiento de la fase 2 (Penagos, 2018).



Fase 3. El cierre brusco origina el golpe de ariete, ocasionando ondas de presión. Estas ondas de presión originan una sobrepresión.

Figura 12

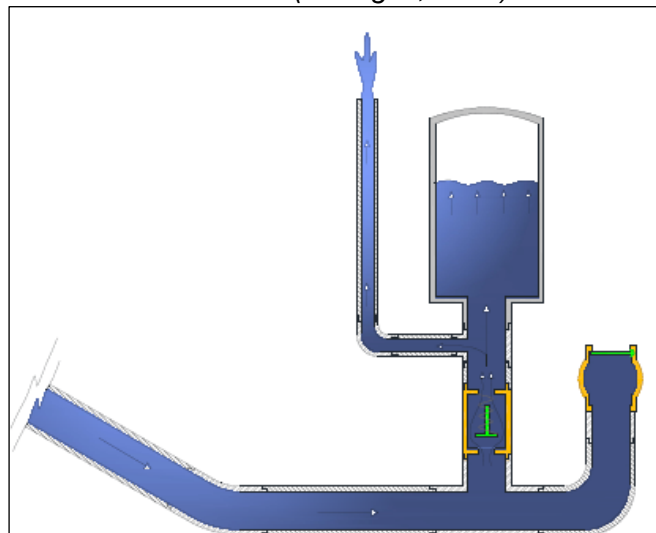
Esquema de funcionamiento de la fase 3 (Penagos, 2018).



Fase 4. La sobrepresión que se genera en el cuerpo del ariete hace que se abra la válvula de descarga, e ingrese agua a la cámara de aire, generando presión a la masa de aire que se encuentra dentro de la cámara.

Figura 13

Esquema de funcionamiento de la fase 4 (Penagos, 2018).

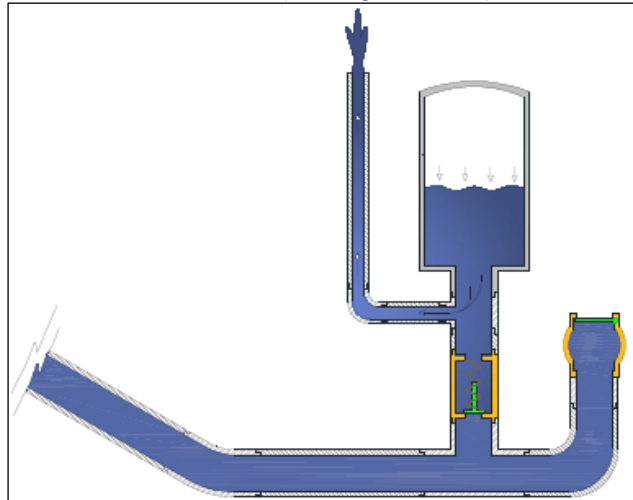


Fase 5. El agua que ingresa a la cámara comprime a la masa de aire, hasta un punto de equilibrio, donde el aire ahora se descomprime, es decir, ahora el aire comprime a la masa de agua, y como consecuencia se cierra la válvula de descarga o válvula de

retención, y por la fuerza de presión que sigue generando el aire al agua, hace que esta fluya por la tubería de descarga (Zárate, 2002).

Figura 14

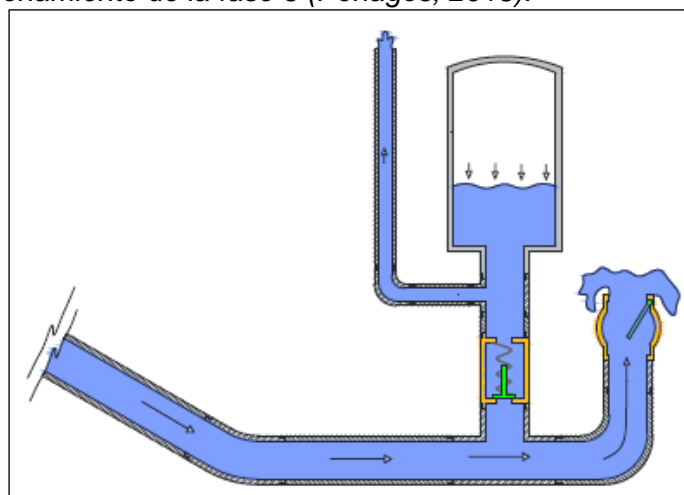
Esquema de funcionamiento de la fase 5 (Penagos, 2018).



Fase 6. Al momento que se cierra la válvula de retención o válvula de descarga, se genera cierto vacío o depresión en el cuerpo del ariete, como consecuencia, se abre la válvula impulsora. De esta manera se cierra el ciclo.

Figura 15

Esquema de funcionamiento de la fase 6 (Penagos, 2018).



1.13. Desarrollo de los modelos matemáticos de la bomba de ariete hidráulico

1.13.1. Modelos matemáticos existentes

Aparte del modelo de Krol, que es el modelo más detallado y completo, se tiene cuatro modelos sobresalientes, las cuales son de Inversen, Schiller, Lansford y Dugan.

1.13.2. Hipótesis general para todos los modelos

1. Tipo de flujo: flujo unidimensional a lo largo de la tubería de alimentación.
2. Perdida de carga: los factores de perdida de carga en los diferentes componentes del ariete hidráulico se determinan de manera experimental en condiciones de flujo estacionario.
3. Elementos considerados: ningún modelo considera la cámara de aire y la válvula de admisión de aire.
4. El cierre de las válvulas impulsoras se considera instantáneo, es decir, no posee inercia. Esta restricción es fundamental por la escasez de conocimiento sobre el comportamiento dinámico de la válvula impulsora.
5. Solo la velocidad de flujo y variaciones de diferencia de presión promedio son considerados en el sistema.

1.13.3. Modelo matemático de Krol

Debido al gran estudio de la bomba de ariete, este posee varios modelos matemáticos como se mencionó anteriormente. Pero el modelo que tiene más trascendencia y es más desarrollado, es de Krol, que presenta una correlación relevante y satisfactoria, de lo teórico con lo experimental. Dada su gran precisión para tareas de

ingeniería, se usa este modelo para determinar las principales variables de la bomba de ariete hidráulico (Galarza, 2013).

1.13.3.1. Teoría de Krol

Krol emplea las ecuaciones del modelo de Schiller, y emplea un modelo teórico experimental. Asimismo, para un estudio aceptable, divide al ciclo hidráulico del ariete en siete periodos, a los cuales somete las leyes generales de la física. Su teoría está amparada con el estudio experimental de un ariete diseñado especialmente para este propósito (Galarza, 2013).

Esta teoría muestra una desviación máxima del 15% entre lo teórico y lo experimental. Las variables que se pueden regular y ajustar son:

- a. Altura de descarga.
- b. Longitud de la carrera de la válvula impulsora.
- c. El peso de la válvula impulsora.
- d. Tipo de válvula de descarga o válvula de servicio.
- e. Volumen de la cámara de aire.

A continuación, se desarrollarán los siete periodos.

Periodo 1: En este periodo la válvula impulsora está abierta, debido al retroceso del flujo de agua al final del periodo anterior (Periodo 7), causando una depresión o presión negativa en el cuerpo del ariete, que es la distancia que retrocede la columna de agua en la tubería de suministro, desde su extremo inferior. En el periodo 1 se considera al agua como flujo incomprensible. Al periodo 1 también se le denomina aceleración, ya que el flujo de agua se pierde hasta que obtenga una energía cinética suficiente para cerrar la válvula impulsora (Galarza, 2013).

La presión que existe en el cuerpo del ariete es la atmosférica y el agua en la tubería de alimentación está en reposo; estado que ira variando por la acción de la carga de agua del tanque de alimentación. La válvula de descarga o la válvula de retención se mantiene cerrada gracias a la carga que actúa sobre ella. Asimismo, se forma una pequeña cantidad de bolsa de aire, que se aloja gracias al vacío o succión que se genera en las inmediaciones de la válvula impulsora, a causa del desperdicio de flujo de agua(Galarza, 2013).

$$V_1 = \sqrt{\frac{2 * g * H * y}{L}} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$t_1 = \sqrt{\frac{2 * L * y}{g * H}} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

H: altura de alimentación(m)

L: longitud de la tubería de alimentación(m)

y: distancia debido al retroceso del agua(m)

V_1 : velocidad del agua en la tubería de alimentación durante el periodo 1(m/s)

g: aceleración de la gravedad(m/s^2)

Periodo 2: El flujo se acelera al máximo por la válvula impulsora abierta. El agua sigue acelerándose hasta alcanzar la velocidad V_2 , y adquirir suficiente fuerza de arrastre para desequilibrar el peso de la placa de la válvula impulsora, y generar que la válvula impulsora se cierre. Esta velocidad se representa con la siguiente ecuación (Galarza, 2013).

$$V_2 = \sqrt{\frac{W * g}{\Phi_{(s)} * A * \gamma}} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$F_{arr} = \frac{\Phi_{(s)} * A * \gamma * V_2^2}{g}$$

Ecuación 9

$$\Phi_{(s)} = \frac{0.282 - 8.854 * S + 0.8 * 10^{(0.52 - 270 * S)}}{S}$$

Ecuación 10

Donde:

V_2 : velocidad del fluido para el cierre de la válvula(m/s).

W: peso de la válvula impulsora (N).

$\Phi_{(s)}$: coeficiente de arrastre de la válvula impulsora.

A: área de la válvula impulsora(m^2).

γ : peso específico (N/m^3).

S: carrera de la válvula impulsora(m).

F_{arr} : fuerza de arrastre.

La velocidad del agua en la tubería, suficiente como para que se cierre la válvula de impulso es:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2g * H}{M}}$$

Ecuación 11

$$t_2 = \frac{L}{\sqrt{2g * H * M}} \ln \left(\frac{\left(1 + \sqrt{\frac{W * M}{2A * H * \gamma * k_0}} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{y * M}{L}} \right)}{\left(1 - \sqrt{\frac{W * M}{2A * H * \gamma * k_0}} \right) \left(1 + \sqrt{\frac{y * M}{L}} \right)} \right)$$

Ecuación 12

$$c = \sqrt{\frac{k_0}{\rho}}$$

Ecuación 13

Donde:

c: velocidad de la onda(m/s).

ρ : densidad del agua(kg/m^3).

M: coeficiente de perdidas agrupado.

k_0 : coeficiente de resistencia de cierre de la válvula impulsora.

H: altura de alimentación.

L: longitud de la tubería de alimentación.

Periodo 3: La velocidad que adquiere el flujo de agua, hace que la acción de la fuerza de arrastre a la superficie interior de la válvula impulsora sea superior que el peso de la placa de la válvula impulsora. Por lo tanto, la válvula impulsora inicia a cerrarse, y es completado su cierre al final de este periodo (Galarza, 2013).

$$F_{arr} = W \quad \text{Ecuación 14}$$

$$V_3 = V_2 \quad \text{Ecuación 15}$$

$$t_3 = \sqrt[3]{\frac{3 * L * S * V_2}{2 * g^2 * H * \left(1 - \frac{W * M}{Z_1^2}\right)}} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

S: carrera de la válvula impulsora(m)

$$Z_1 = \sqrt{2 * \Phi_{(s)} * A * H * \gamma} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$M = 1 + \sum j + 4 * f * \frac{L}{D} + R_{(s)} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$R_{(s)} = \frac{2.43 - 1.06 * S + 10^{(0.95 - 13.3 * S)}}{S} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

Z_1 : coeficiente de corrección.

M: coeficiente de perdidas agrupado.

S: carrera de la válvula impulsora(pulg).

W: peso de la válvula impulsora (N).

$R_{(s)}$: coeficiente de perdida de carga en la válvula impulsora(adimensional).

Σj : perdidas menores o localizadas.

$4f \frac{L}{D}$: perdidas por fricción en la tubería.

Periodo 4: Cuando termina el periodo 3, la válvula impulsora se cierra completamente y ocurre una retardación repentina, causando la apertura de la válvula de descarga o válvula de retención, y al mismo tiempo se reduce la velocidad en la tubería de alimentación, en proporción a la altura de presión ($h_s + h_r$), originada en exceso por la altura de alimentación H.

El periodo 4 tiene una duración casi instantánea, por lo cual se puede sobreentender que:

$$t_4 = \frac{2 \cdot L}{c} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$V_4 = V_3 - (h_s + h_r) \cdot \frac{g}{c} \quad \text{Ecuación 21}$$

$$h_r = 5.64 \cdot \left(1 - \frac{h_s}{h_{\max}}\right) \quad \text{Ecuación 22}$$

$$h_{\max} = \frac{c \cdot V_3}{g} \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde:

c: velocidad de la onda(m/s)

h_s : altura de descarga (por encima de la altura de alimentación en m)

h_r : pérdida de carga durante el bombeo

h_{max} : altura máxima de descarga (m)

Periodo 5: La válvula de retención o válvula de descarga se abre completamente y el agua ingresa a la cámara de aire con una velocidad V_4 , en ese instante se aprovecha la energía disponible para bombear un caudal q , venciendo la carga (h_s+h_r) , que es equivalente a la energía cinética alcanzada al término del periodo 3-4, restando la energía cinética consumida en la compresión del flujo, y en la expansión o dilatación de las paredes de la tubería (Galarza, 2013).

$$V_5 = 0 \quad \text{Ecuación 24}$$

$$t_5 = \frac{L}{(h_s+h_r)*g} \left(\sqrt{\frac{W*g}{A*\gamma*ko}} - \frac{(h_s+h_r)*g}{c} \right) \quad \text{Ecuación 25}$$

k_o : coeficiente de resistencia de cierre de la válvula impulsora.

Periodo 6: Al término del periodo 5, el ingreso de agua en la válvula de retención o descarga es nula, y la energía total almacenada en la cámara de aire es consumido por el bombeo. La válvula de servicio o retención está cerrada. Este cierre de la válvula de descarga hace que la tubería de alimentación se mantenga bajo la altura de presión total $(H+h_s+h_r)$, repentinamente regresando a la altura estática disponible H (Galarza, 2013).

El periodo de duración que tiene este cambio es muy breve, y puede ser calculado como el tiempo necesario para una reflexión completa de una onda de presión.

$$t_6 = \frac{2L}{c} \quad \text{Ecuación 26}$$

El valor de la velocidad negativa con la que el flujo se mueve en dirección contraria desde la válvula impulsora puede ser calculada igualando la energía de deformación del agua y de la tubería de alimentación (Galarza, 2013).

$$V_6 = - \frac{(h_s + h_r)g}{c} \quad \text{Ecuación 27}$$

Periodo 7: Al término del periodo 6, el flujo de agua adopta una velocidad negativa en la tubería de alimentación, como consecuencia, la válvula impulsora se abre por la acción de su peso, y por una diferencia de presión, originada por el retroceso del flujo de agua (Galarza, 2013).

$$V_7 = 0 \quad \text{Ecuación 28}$$

$$t_7 = - \frac{L*(h + h_r)}{H*c} \quad \text{Ecuación 29}$$

Una forma de calcular el caudal de descarga de una bomba de ariete hidráulico es utilizando la siguiente ecuación:

$$q = \frac{1}{T} * \frac{\pi * D_{\text{Check}}^2}{4} * \int_{t_1}^{t_1+t_4} V_2(t) dt \quad \text{Ecuación 30}$$

Donde:

q: caudal de bombeo (m³/s)

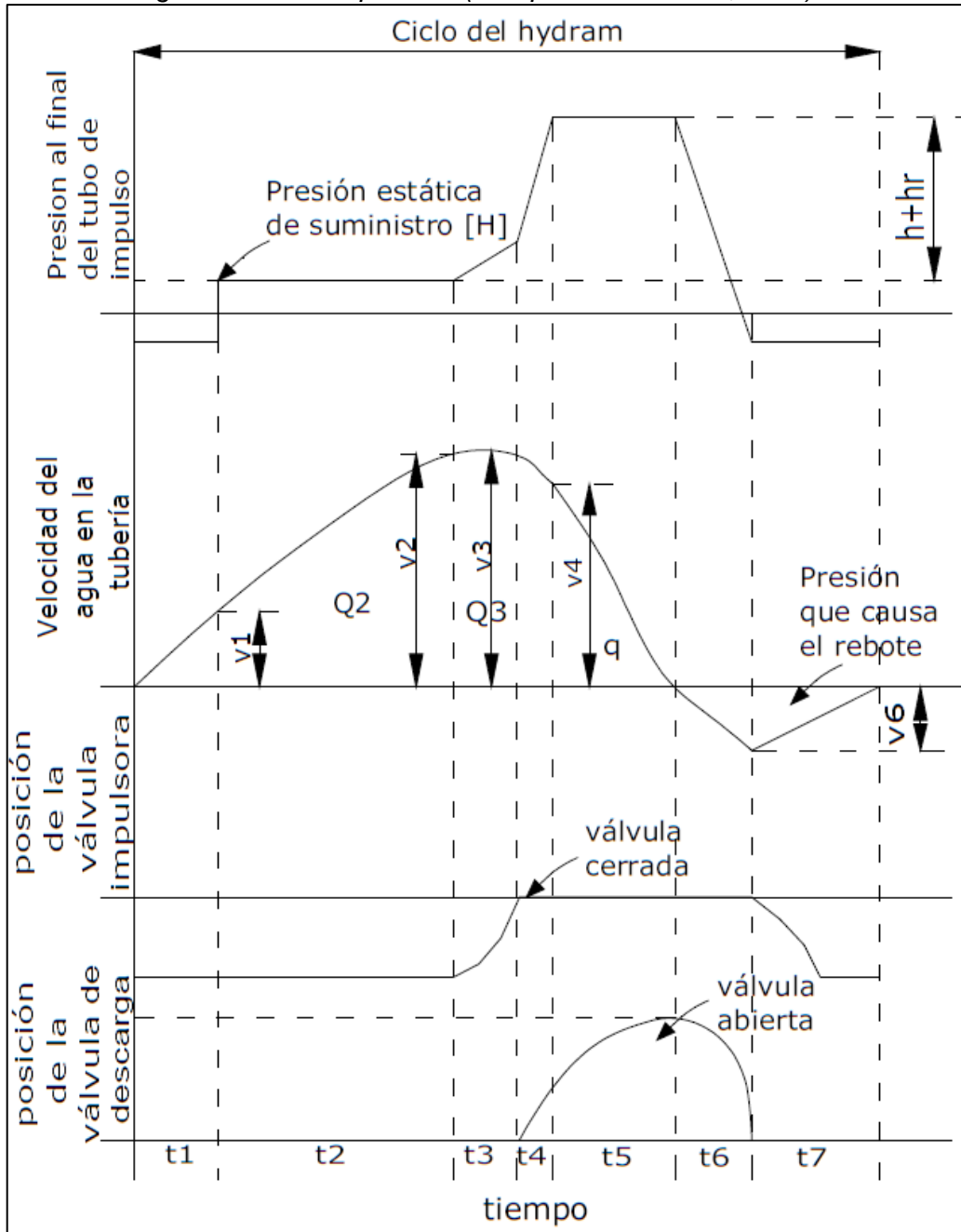
D_{Check}: diámetro de la válvula de descarga (m)

V₂(t) : velocidad en la tubería de impulsión (m/s)

T: tiempo o periodo del ciclo (s)

Figura 16

Comportamiento de la presión, velocidad, posición de la válvula impulsora y posición válvula de descarga durante los 7 periodos (Campaña & Guamán, 2011).



Caudal perdido: Q_2+Q_3

1.13.4. Modelo matemático que define la eficiencia de la bomba de ariete hidráulico.

$$q = \frac{\frac{A_t * L * V_3^2}{2g} - \frac{A_t * L * g * (h + h_r)^2}{2c^2}}{(h + h_r)} \quad \text{Ecuación 31}$$

reemplazando: $V_3 = \sqrt{\frac{W * g}{\Phi_{(s)} * A * \gamma}}$

Por lo tanto, el caudal bombeado por ciclo es:

$$q = \frac{\frac{A_t * L}{A * 2} * \frac{W}{\Phi_{(s)} * \gamma} - \frac{A_t * L * g * (h_s + h_r)^2}{2c^2}}{h_s + h_r} \quad \text{Ecuación 32}$$

donde:

q: cantidad de agua bombeada por ciclo (m³)

A: área de la válvula impulsora (m²)

A_t: área interna de la tubería de alimentación (m²)

W: peso de la válvula impulsora (N)

La fórmula para calcular la eficiencia es:

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} = \frac{hq}{HQ}$$

P_{salida}: potencia de salida

P_{entrada}: potencia de entrada

1.14. Dimensionamiento y criterios de diseño de los componentes de la bomba de ariete hidráulico

1.14.1. Tanque de alimentación

El tanque de alimentación debe estar provisto por las siguientes tuberías: tubería de llegada, tubería de salida, tubería de desagüe, y en caso de que sea necesario, se coloca una tubería de rebose, esto a veces empalma a la tubería de desagüe. La salida de la tubería de alimentación debe estar por lo menos 10 cm por encima del fondo del tanque para evitar entrada de sedimentos. Asimismo, se recomienda una altura de agua mínimo de 40 cm para evitar el ingreso de aire a la tubería de alimentación (Galarza, 2013).

1.14.2. Caudal de alimentación

El caudal de alimentación debe ser continuo para garantizar el funcionamiento adecuado de la bomba de ariete. El nivel de agua en el tanque de alimentación debe permanecer constante, ya que si no afecta el normal funcionamiento de la bomba de ariete (Galarza, 2013).

1.14.3. Diámetro de la tubería de alimentación

El adecuado diseño del diámetro de la tubería de alimentación asegura la velocidad eficaz con la que se cierra la válvula impulsora, por eso es importante su correcta selección (Galarza, 2013).

1.14.4. Longitud de tubería de alimentación

El funcionamiento automático de la bomba de ariete depende de la longitud de la tubería de alimentación. Debe tener una extensión adecuada. Si la tubería es muy larga, la variación en volumen entre la expansión y contracción no es idónea para originar el vacío necesario para que se abra la válvula impulsora. Y si la tubería es muy corta, el intervalo de tiempo entre los dos extremos será muy pequeño para vencer la inercia de la válvula impulsora y hacer que se cierre (Galarza, 2013).

La longitud de la tubería de alimentación se puede calcular de dos formas: en función del diámetro de la tubería de alimentación y en función de la altura de alimentación.

En función del diámetro de la tubería de alimentación:

Tabla 3

Longitud de la tubería de alimentación en función del diámetro de la tubería de alimentación (Galarza, 2013).

Longitud mínima	$L = 150 \cdot D$
Longitud optima	$L = 500 \cdot D$
Longitud máxima	$L = 1000 \cdot D$

La relación entre longitud de la tubería de alimentación y diámetro de la tubería de alimentación se debe mantener dentro del intervalo de la ecuación 33, ya que sino la bomba de ariete funcionara deficientemente (Galarza, 2013).

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

Ecuación 33

En función de la altura de alimentación(H):

Tabla 4

Longitud de la tubería de alimentación en función de la altura de alimentación (Galarza, 2013).

H	L
$H \leq 4.5 \text{ m}$	$L = 5*H$
$4.5 < H \leq 8 \text{ m}$	$L = 4*H$
$8 < H \leq 16 \text{ m}$	$L = 3*H$
$H \geq 16 \text{ m}$	$L = 2*H$

1.14.5. Altura de alimentación

La altura de alimentación es la energía que se utiliza para accionar el funcionamiento de la válvula impulsora y originar el golpe de ariete. El intervalo de la altura se debe encontrar entre 1 m a 30 m. Con alturas inferiores a 1 m, ocasiona deficiencias en el funcionamiento del ariete, y para alturas superiores a 30 m, el ariete corre el riesgo de fallar, es decir, las válvulas impulsoras y el cuerpo del ariete pueden colapsar (Galarza, 2013).

$$1 \text{ m} \leq H \leq 30 \text{ m} \quad \text{Ecuación 34}$$

La altura de alimentación se relaciona con la longitud de la tubería de alimentación de la siguiente manera.

$$4*H \leq L \leq 10*H \quad \text{Ecuación 35}$$

Generalmente con fines didácticos, el valor de la altura de alimentación se define de la siguiente manera.

$$L = 5*H \quad \text{Ecuación 36}$$

Donde:

L: longitud de la tubería de alimentación(m)

H: altura de alimentación (considerado desde el piso hasta el inicio de la tubería de alimentación en m)

Por otro lado, Watt (1974), recomienda una altura de alimentación de 1m a 12 m; asimismo, este autor, recomienda tener en cuenta la relación de la ecuación 37 para el dimensionamiento de las alturas.

$$H = \frac{1}{3}h \quad \text{Ecuación 37}$$

Donde:

H: altura de alimentación

h: altura de descarga

1.14.6. Cuerpo del ariete

El cuerpo de ariete hidráulico es el componente que enlaza a la tubería de alimentación, la válvula descarga y las válvulas impulsoras. El diseño y construcción de este componente debe ser óptimo para resistir la presión con el cual ingresa el fluido al ariete, y ser capaz de resistir la sobrepresión que se origina después del golpe de ariete (Penagos, 2018).

El cuerpo del ariete es el componente donde se genera la oscilación de la onda de presión. Es sugerible que los materiales, para el diseño de este componente, sean de hierro galvanizado para que la magnitud de celeridad de la onda producida sea lo máximo posible, ya que, si es material elástico, la sobrepresión se puede disipar más fácil (Otí, 2017).

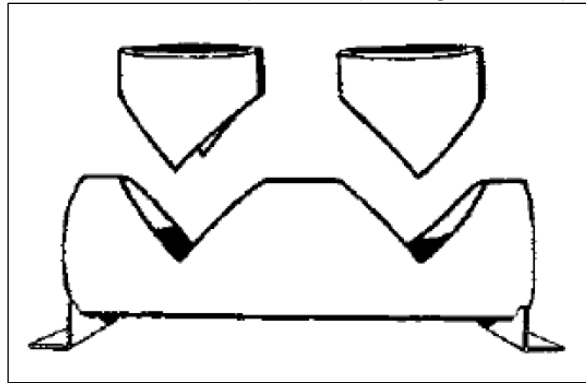
A continuación, se detalla los tipos de diseño del cuerpo de ariete.

1.14.6.1. Cuerpo fabricado con tubería

En este tipo de cuerpo de ariete, el ensamblaje de la válvula impulsora, la válvula de descarga y la tubería de alimentación, se realiza mediante accesorios de PVC. También mediante unión por soldadura de accesorios metálicos. El diseño y construcción no es complicado, pero posee la desventaja, que la modificación del área transversal sea muy brusca (Penagos, 2018).

Figura 17

Cuerpo fabricado con tubería metálica o plástico (Penagos, 2018).

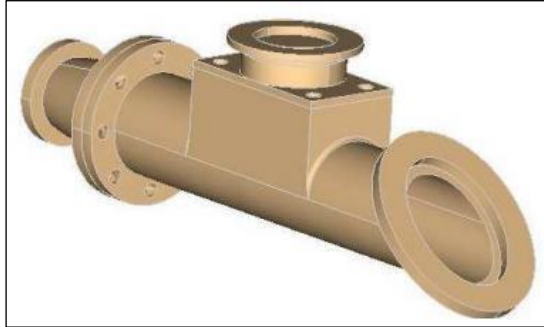


1.14.6.2. Cuerpo unido mediante bridas

En este diseño, hay un aumento en el volumen del cuerpo del ariete, asimismo no hay pérdida de presión ni de velocidad, debido a la hidrodinámica que este posee. Por otro lado, tiene una desventaja, ya que su diseño y construcción es más difícil, y es más elaborado que el anterior (Penagos, 2018).

Figura 18

Modelo digital de un cuerpo de ariete fabricado con bridas (Penagos, 2018).



1.14.6.3. Cuerpo diseñado mediante fundición.

Este método se distingue por la fundición del hierro para fabricar el cuerpo del ariete. Este tipo de diseño garantiza un área de sección transversal definida para amortiguar una variación brusca de la dirección del flujo. El costo de fabricación de este tipo de cuerpo de ariete es muy alto (Penagos, 2018).

1.14.7. Válvula impulsora

El golpe de ariete se origina en la válvula impulsora. Por lo tanto, su diseño es fundamental en el funcionamiento de la bomba de ariete. La mayor magnitud de la onda de presión que genera el golpe de ariete, por ende, una alta sobrepresión, dependerá del tiempo y la velocidad de cierre; lo que se traduce en la fuerza que debe ejercer la masa de agua a la placa horizontal de la válvula impulsora para cerrarla. Cuanto mayor sea esta fuerza, mayor será la capacidad de la bomba para elevar el agua a una altura mayor (Mota, 2014).

La válvula impulsora es uno de los componentes más sensibles e importantes de la bomba de ariete. Una selección correcta del tipo de válvula impulsora a utilizar garantiza un funcionamiento eficiente de la bomba de ariete. Para una apropiada operación de la

válvula impulsora, este debe cumplir con las siguientes propiedades: soportar el golpe de ariete, prevenir la excesiva resistencia a la fuerza del flujo para que su cierre sea factible, resistir a cualquier falla por fatiga, vida útil elevado y que no produzca estrangulamiento; siendo esta última característica, uno de los más importantes (Campaña & Guamán, 2011).

Hay muchos tipos de válvulas impulsoras, pero todos sirven para el mismo propósito. Algunas válvulas impulsoras permiten la regulación de la fuerza necesaria para cerrarlo y abrirlo; por ejemplo, el uso de un resorte, cuya longitud o carrera se puede regular. Asimismo, hay otras válvulas que permiten hacer este ajuste mediante la colocación y eliminación de pesas (Mota, 2014).

A continuación, se detalla los tipos de válvulas impulsoras según su regulación.

1.14.7.1. Válvula impulsora regulada con resorte.

Para el diseño de este tipo de válvula impulsora, el desplazamiento o recorrido de la placa de la válvula impulsora lo limita un resorte. Aunque su diseño es fácil, se requiere de métodos de fabricación un poco exactos para su construcción. Una ventaja de estas válvulas es que pueden ser colocadas horizontal o verticalmente (Campaña & Guamán, 2011).

Figura 19

Válvula impulsora regulada con resorte (Mota, 2014).

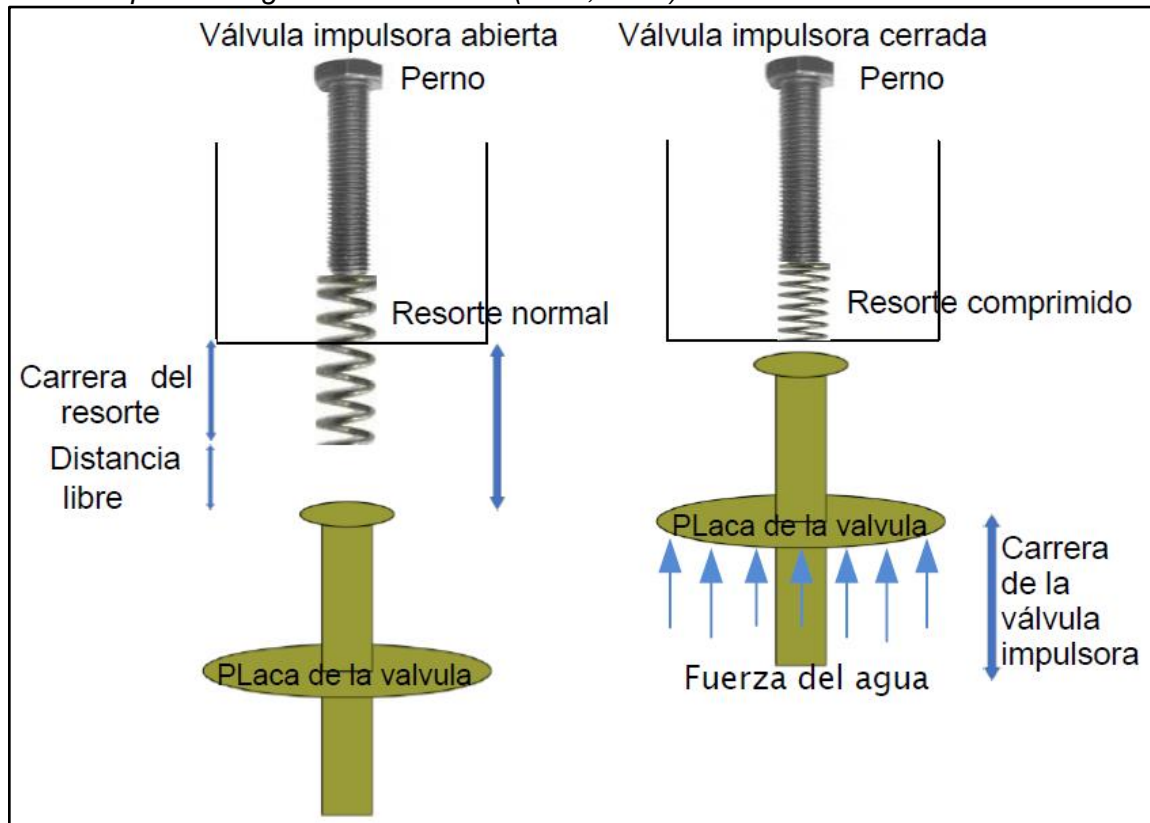
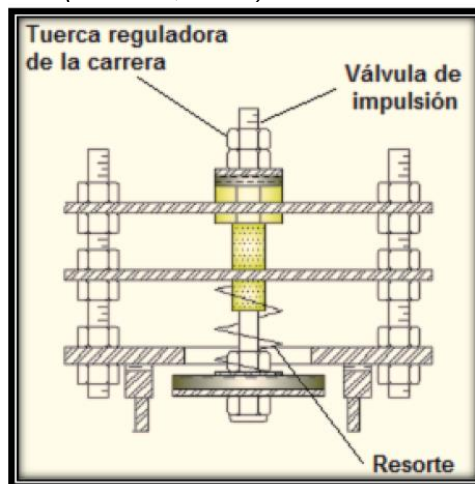


Figura 20

Válvula impulsora con resorte (Galarza, 2013).



El resorte debe tener un diámetro igual al diámetro del perno para permitir que se enrosque en el perno. Con este conjunto perno y resorte, el resorte actúa directamente

sobre el área transversal de la placa horizontal de la válvula impulsora, y oscila o hace su desplazamiento mientras se comprime y se descomprime (Mota, 2014).

1.14.7.1.1. Carrera del resorte para regular la válvula impulsora.

La carrera del resorte es la longitud del resorte que recorre para comprimirse y descomprimirse, esto para generar el cierre y apertura de la placa horizontal de la válvula impulsora. El adecuado ajuste de la carrera del resorte asegura el funcionamiento automático de la bomba de ariete, esto para cualquier altura de alimentación y diámetro de la tubería de alimentación. Se puede suscitar casos donde no es necesario la carrera del resorte para el funcionamiento de la bomba de ariete, eso dependerá de la altura de alimentación, diámetro de la tubería de alimentación y la cantidad de válvulas impulsoras colocadas.

El resorte se comprime al momento de cerrarse la válvula impulsora, ya que la placa de la válvula impulsora actúa directamente sobre el resorte; esto sucede gracias a la fuerza de arrastre que empuja a la placa horizontal de la válvula impulsora hacia arriba, esto ocurre durante la aceleración del fluido en la tubería de alimentación. Luego de esto, el resorte comprimido empuja hacia abajo a la placa horizontal de la válvula impulsora para generar su apertura, gracias a la fuerza elástica acumulada y el propio peso de la placa; esto sucede durante la desaceleración, retroceso o vacío que se genera en el cuerpo del ariete. De esta manera el resorte recorre para generar, y asegurar el cierre y apertura de la válvula impulsora de forma automática.

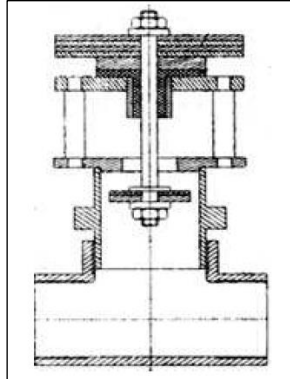
1.14.7.2. Válvula impulsora regulada con pesas.

Este tipo de regulación se realiza con la eliminación y adición de pesas, en el eje de la placa de la válvula impulsora.

1.14.7.2.1. *Válvula impulsora con pesas encima.*

Figura 21

Válvula impulsora con pesas encima (Campaña & Guamán, 2011).

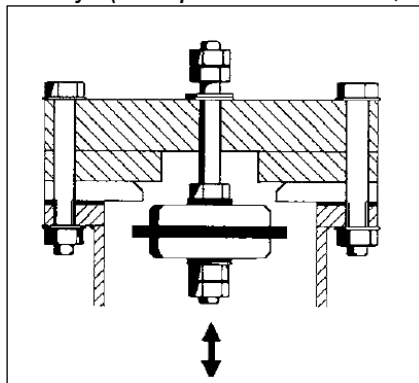


El diseño de esta válvula es robusto, lo que garantiza un funcionamiento y operación conveniente para un periodo de vida útil alto. Las pesas son las que regulan el recorrido o el desplazamiento de las válvulas impulsoras, influyendo así en la velocidad de cierre. Una desventaja de estas válvulas es que, para su operación, requieren estar colocadas verticalmente para que las pesas aumenten la fuerza de gravedad (Campaña & Guamán, 2011).

1.14.7.2.2. *Válvula impulsora con pesas debajo.*

Figura 22

Válvula impulsora con pesas debajo (Campaña & Guamán, 2011).



Esta válvula posee una construcción robusta, pero a la vez ligera. La configuración de esta válvula es compacta. Las pesas se colocan debajo de la tapa de la válvula de impulso. Al igual que en el caso anterior, el desplazamiento y el recorrido de la carrera de la válvula impulsora está regulada por las pesas (Campaña & Guamán, 2011).

1.14.7.3. Configuración de las válvulas impulsoras.

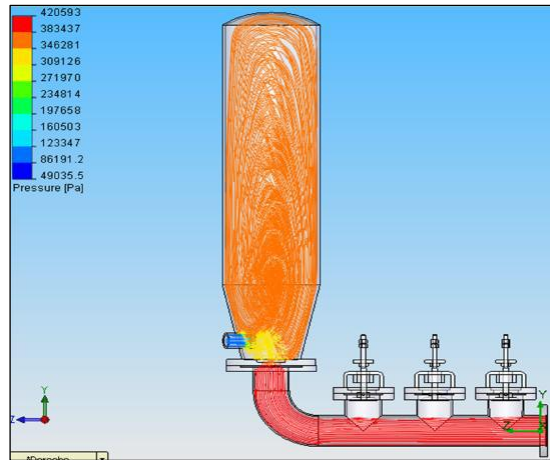
En una bomba de ariete hidráulico multipulsor, es decir, una bomba de ariete con más de una válvula impulsora, las válvulas impulsoras se pueden configurar en serie y en paralelo.

1.14.7.3.1. Configuración de las válvulas impulsoras en serie.

Esta configuración consiste, en la colocación de las válvulas impulsoras en una misma línea de la tubería. Al colocar las válvulas impulsoras de manera continua, una tras otra, se produce el mismo resultado que se produciría, si la bomba de ariete fuera convencional, pero con una ventaja valioso, ya que ahora no solo se va a cerrar una sola válvula impulsora, sino más de una válvula impulsora. Estas válvulas impulsoras se van a abrir en tiempos desfasados, pero esos tiempos de desfase serán insignificantes, con lo cual van a tener la misma consideración, como si se cerraran al mismo tiempo; haciendo que las ondas de presión se multipliquen en un ciclo (Bustamante & Quezada, 2009).

Figura 23

Bomba de ariete hidráulico multipulsor con válvulas impulsoras en serie (Bustamante & Quezada, 2009).



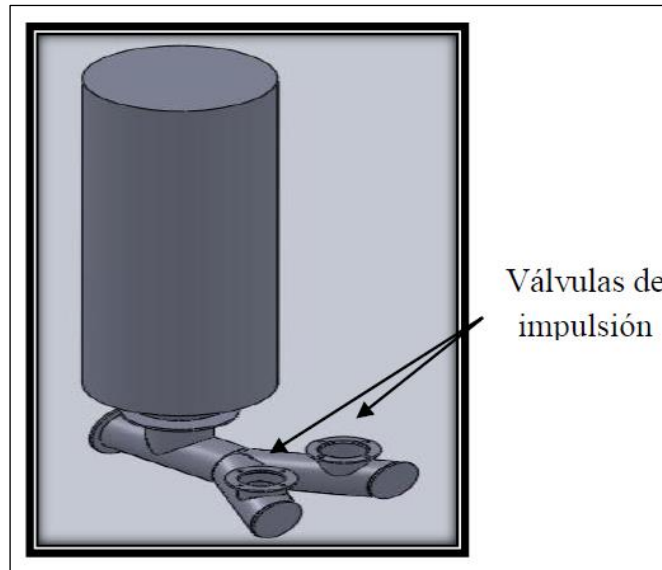
1.14.7.3.2. Configuración de las válvulas de impulsoras en paralelo.

Consiste en la colocación de las válvulas impulsoras simétricamente en líneas diferentes, pero con la condición de que esas líneas converjan en un mismo punto.

Estas válvulas impulsoras deben estar configurados en simultaneo, es decir, las válvulas impulsoras deben tener las mismas dimensiones en: forma, diámetro, peso y carrera, esto para producir con la misma intensidad las ondas de presión por separado. Estas ondas de presión convergen en un mismo punto, para después transformarse en una onda más grande (Galarza, 2013).

Figura 24

Bomba de ariete hidráulico multipulsor con válvulas de impulsoras en paralelo (Galarza, 2013).



1.14.7.4. Golpes por minuto de la válvula impulsora.

El número de golpes por minuto es la cantidad de veces que la placa de la válvula impulsora recorre para cerrarse y abrirse en un minuto. Esto considerando que inicialmente la válvula impulsora se encuentra abierta. También se le denomina pulsaciones o ciclos por minuto. En cada golpe, la bomba de ariete descarga cierto caudal por la tubería de descarga de manera continua, ya que los golpes son seguidos (Otí, 2017).

Generalmente los golpes por segundo son de uno o dos, y cuanto más lento sea el funcionamiento de un ciclo; la bomba de ariete utilizara más agua y bombeara a mayor altura.

El tiempo que se emplea en un pulso, es la suma del tiempo de cierre y tiempo de apertura de la válvula impulsora (Otí, 2017).

1.14.7.5. Carrera de la válvula impulsora.

La carrera de la válvula impulsora es la longitud que recorre la placa horizontal de la válvula impulsora para generar el cierre y la apertura de la válvula impulsora.

Es el recorrido que realiza la válvula impulsora, es decir, la longitud vertical que recorre la placa de la válvula impulsora, desde la posición totalmente abierta hasta que se produzca completamente su cierre (Acitores, 2012).

La carrera de la válvula impulsora es uno de los parámetros que se puede ajustar o manipular, después de instalar la bomba de ariete. Con un correcto ajuste y sintonización de la carrera de la válvula impulsora, se obtiene mayores caudales de descarga, por lo tanto, mejor eficiencia (Galarza, 2013).

Un incremento en conjunto del peso de la válvula impulsora y la carrera de la válvula impulsora, o un incremento por separado de ambos, incrementa el caudal de descarga, como consecuencia aumenta la duración del ciclo, disminuyendo así, las pulsaciones por minuto de la bomba de ariete (Otí, 2017).

1.14.7.6. Peso de la válvula impulsora.

Otro parámetro que se puede variar o manipular, después de instalar la bomba de ariete, es el peso de la válvula impulsora. Un adecuado ajuste del peso de la válvula impulsora, puede mejorar la eficiencia de la bomba de ariete (Galarza, 2013).

1.14.8. Válvula de descarga

Es la válvula de servicio que permite el ingreso de agua hacia la cámara de aire en una sola dirección. El agua ingresa a partir del cuerpo de la bomba de ariete. También enlaza, a la cámara de aire, la tubería de descarga y cuerpo de la bomba de ariete. La apertura de esta válvula se origina por efecto de la sobrepresión que genera el golpe de ariete (Otí, 2017).

1.14.9. Cámara de aire

La cámara posee en su interior, cierta cantidad de aire almacenada, cuya compresibilidad le permite almacenar la energía del impulso, provocado por el cierre brusco de la válvula impulsora, y que posteriormente lo libera en el caudal de bombeo (Mota, 2014).

La cámara de aire favorece a suministrar, un bombeo continuo de agua a una proporción relativamente uniforme, es decir, modifica el funcionamiento irregular de la bomba a una operación continuo. La cámara debe contener siempre aire, lo suficiente para comprimir y regular el golpe de ariete. Si la cámara logra llenarse totalmente con agua, el golpe será brusco, originando fallas en los componentes del sistema (Galarza, 2013).

El volumen de la cámara de aire debe encontrarse en el rango de 20 a 50 veces el diámetro de la tubería de alimentación. Está comprobado, que la operación o funcionamiento óptimo se consigue, cuando el nivel de agua en la cámara de aire está por encima del nivel de salida de la tubería de descarga. Recientes estudios recomiendan que la dimensión del volumen de la cámara de aire tiene que estar en los siguientes intervalos, como se observa en la tabla 5 (Galarza, 2013).

Tabla 5

Criterios de diseño de la cámara de aire (Galarza, 2013).

Parámetro	Criterio
Diámetro de la cámara de aire	3*Diámetro de la tubería alimentación
Altura de la cámara de aire	10*Diámetro de la tubería alimentación

1.14.9.1. Conservación y admisión de aire en la cámara de aire.

La conservación y admisión de aire en la cámara de aire es esencial para el funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico, puesto que, en cada golpe de ariete, la cámara va disminuyendo su reserva de aire. Por lo tanto, es imprescindible garantizar un volumen de aire, lo más permanente posible (Penagos, 2018).

Para el ingreso y la conservación del aire, se puede utilizar los siguientes métodos:

Orificio: es una pequeña abertura en forma circular que se perfora antes de la válvula de descarga o válvula de entrega. Posee la desventaja que, si el orificio circular es muy grande, la cámara se llena totalmente con aire; mientras que, si el orificio circular es muy diminuto, no permite el ingreso de aire suficiente como para mantener el colchón de aire necesario para el funcionamiento del ariete (Penagos, 2018).

Globos o bolas internas: para garantizar la permanencia de aire dentro de la cámara de aire, se pueden colocar bolas de plástico o pelotas de tenis dentro de la cámara. Con este método se descarta realizar el método anterior (Penagos, 2018).

1.14.10. Tubería de descarga

Por medio de este tubo se empuja el agua desde la bomba de ariete hasta el depósito de descarga. Esta tubería puede ser de material flexible, ya que no le afecta el golpe de ariete, y además facilita su instalación. La selección del diámetro de esta tubería

debe ser menor, en relación con el diámetro de la tubería de alimentación, ya que solo se impulsará una parte del caudal de alimentación. Al igual que la tubería de alimentación, se debe utilizar una tubería con una pared interna lisa y se debe evitar curvas pronunciadas en su recorrido, por eso se recomienda manguera de polietileno para evitar las pérdidas de carga (Mota, 2014).

1.14.11. Eficiencia de la bomba de ariete

El rendimiento de la bomba de ariete hidráulico depende principalmente de la relación entre la altura de alimentación y la altura de descarga. También depende del grado de perfección con la que se fabrica la bomba de ariete.

Según Abate (2000), al evaluar la eficiencia de una bomba de ariete hidráulico para dos tipos de materiales de tubería de alimentación: PVC y acero galvanizado. Con tres alturas de alimentación 2.1 m, 3.8 m y 4.7 m, encontró que se puede obtener la máxima eficiencia con hasta 4.2 m de desnivel; además de este valor, demostró que la tubería de acero galvanizado era el más eficiente, y que el número de carreras influye en el rendimiento de la bomba de ariete hidráulico.

Según Quiroga et al. (2013), la proporción entre el área de la válvula de servicio y el área de la válvula impulsora influye considerablemente en la eficiencia de la bomba de ariete, es decir, manteniendo constante el área de la válvula de servicio, y aumentando el área de la válvula impulsora, se obtiene una bomba de ariete con mayor eficiencia.

La bomba de ariete hidráulico en operación normal generalmente puede elevar un caudal máximo de $3154 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, y hasta una altura de descarga máxima de 122 m (Zárate, 2002).

Durante el funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico, se puede considerar dos tipos de eficiencias: eficiencia energética y eficiencia volumétrica.

En esta investigación solo se tomará en cuenta la eficiencia energética.

La eficiencia energética refleja la relación de la energía potencial que tiene el agua en el estado inicial, es decir, generado por la altura de alimentación H_i entre la energía potencial consumida en el bombeo, es decir, lo que se consume en el bombeo hasta una altura de descarga h_i (Mota, 2014).

Por definición, la eficiencia está dada por el cociente de la potencia útil entregada en la descarga entre la potencia recibida por el tanque de alimentación.

$$\eta = \frac{P_u}{P_b} \quad \text{Ecuación 38}$$

Donde:

η : eficiencia

P_u : potencia útil entregada

P_b : potencia absorbida

La eficiencia de la bomba de ariete hidráulico se determina según los siguientes autores:

1.14.11.1. La eficiencia de D' Aubuisson.

D' Aubuisson consideró la altura de descarga o altura de bombeo a partir de la bomba de ariete, es decir, consideró el nivel de referencia al eje horizontal del cuerpo del ariete (Ayala, 2006).

La potencia entregada es: $P_u = q_d * h_i * g * \rho$ Ecuación 39

La potencia absorbida es: $P_b = Q_a * H_i * g * \rho$ Ecuación 40

Por lo tanto, la eficiencia será: $n_D = \frac{q_d * h_i}{Q_a * H_i}$ Ecuación 41

Caudal de alimentación: $Q_a = q_d + Q_p$ Ecuación 42

Donde:

n_D : Eficiencia de D' Aubuisson.

Q_a : caudal de alimentación.

q_d : caudal de descarga.

Q_p : caudal perdido.

h_i : altura de descarga.

H_i : altura de alimentación.

1.14.11.2. La eficiencia de Rankine.

Este autor considera la altura de descarga, por encima de la altura de alimentación, es decir, considera la instalación como un sistema.

Entonces:

La potencia entregada es: $P_u = q_d \cdot (h_i - H_i) \cdot g \cdot \rho$ Ecuación 43

La potencia absorbida es: $P_b = Q_p \cdot H_i \cdot g \cdot \rho$ Ecuación 44

Por lo tanto, la eficiencia será: $\eta_R = \frac{q_d \cdot (h_i - H_i)}{Q_p \cdot H_a}$ Ecuación 45

η_R : Eficiencia de Rankine

q_d : caudal de descarga

Q_p : caudal perdido

h_i : altura de descarga

H_i : altura de alimentación

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

En este capítulo se desarrolla el diseño de los componentes del prototipo de la bomba de ariete hidráulico. Además, se detalla las especificaciones técnicas de los materiales e instrumentos utilizados durante las pruebas experimentales. También se detalla el procedimiento de las pruebas experimentales.

1.15. Diseño del prototipo de la bomba de ariete hidráulico

1.15.1. Altura de alimentación

La altura de alimentación(H), según Galarza(2013) debe ser mínimo de 1 m, esto para el buen funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico. En esta investigación se asumió una altura de alimentación de 2.30 m, medido desde el piso hasta la tangente superior de la tubería de alimentación en la salida.

1.15.2. Longitud de tubería de alimentación

La longitud de la tubería de alimentación(L) se determinó en función de la altura de alimentación (ver tabla 4).

$$L = 5 * H = 5 * 2.30 = 11.50 \text{ m}$$

Cabe señalar que la longitud real que se utilizó, en esta investigación, ha sido 11 m.

Figura 25

Datos técnicos de la tubería de alimentación.

	Tubería de PVC con rosca
	Diámetro nominal 1 1/2"
	Diámetro real 48 mm
	Espesor 3.7 mm

1.15.3. Diámetro de la tubería de alimentación

El diámetro de la tubería de alimentación se determinó en función de la longitud de la tubería de alimentación (ver la ecuación 33).

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

$$150 \leq \frac{11}{D} \leq 1000$$

$$0.011 \text{ m} \leq D \leq 0.073 \text{ m}$$

$$1/2" \leq D \leq 2 1/2"$$


El diámetro que se utilizó en esta investigación ha sido de 1 1/2".

1.15.4. Tanque de alimentación

El tanque de alimentación que se utilizó ha sido de polietileno de color azul, de tipo tambo para almacenamiento de agua, con una altura de 1.10 m y diámetro de 0.60 m. Según Galarza(2013), la altura mínima de agua en el tanque elevado debe ser de 40 cm para asegurar que no ingrese aire a la tubería de alimentación. La altura útil de agua que se mantuvo constante en el tanque elevado ha sido de 80 cm, esto medido a partir de la tangente superior de la tubería de alimentación en la salida.

Figura 26

Características técnicas del tanque de alimentación.

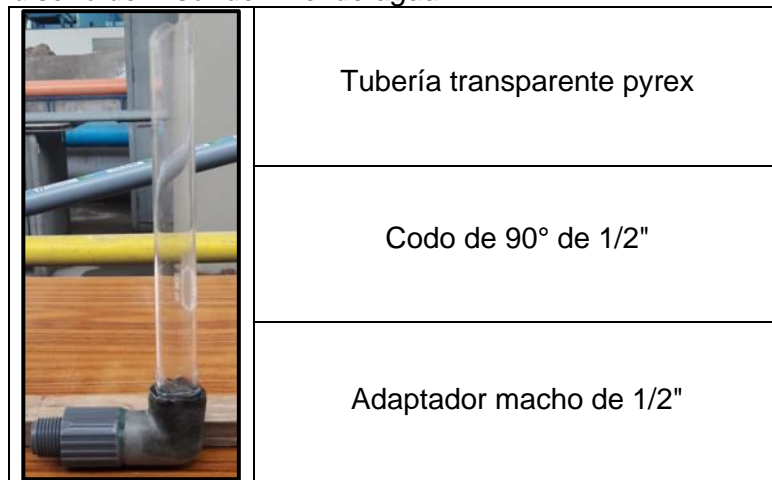
	Volumen de 200 L
	Recipiente tipo tambo
	Material de polietileno

1.15.5. Visor de nivel de agua

Para la visualización del nivel de agua, y asegurar el nivel constante durante las pruebas, se colocó un visor de nivel de agua en el tanque elevado. El visor de nivel de agua se construyó con una tubería pyrex. Se colocó a una altura de 50 cm (ver figura 26) medido a partir de la tangente superior de la tubería de alimentación en la salida. El nivel de agua en el tanque elevado y el nivel de agua en el visor, son iguales por el principio de vasos comunicantes.

Figura 27

Construcción y diseño del visor de nivel de agua.

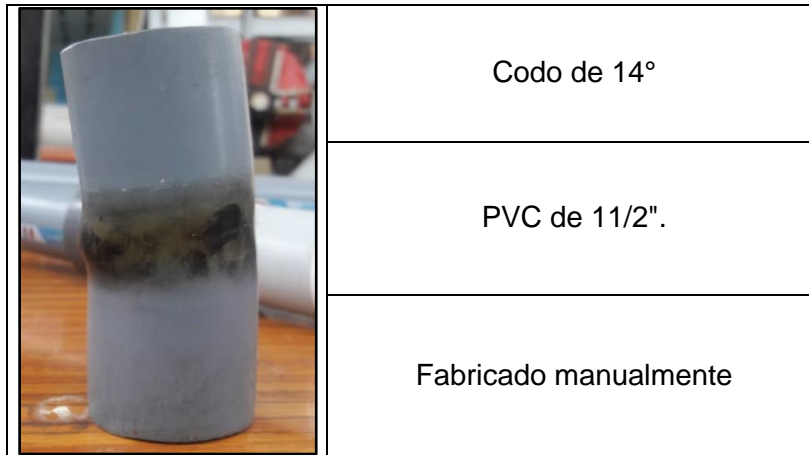


1.15.6. Angulo de inclinación

El ángulo de inclinación que se originó ha sido de 14°. Este ángulo indica la inclinación de la tubería de alimentación con respecto al nivel horizontal del piso. Cabe precisar que no existe un codo de 14°, ya que no es comercial. Para conseguir un accesorio con ese ángulo, se cortó una tubería con rosca de PVC de una longitud de 10 cm. Luego se curvó por termofusión hasta conseguir un ángulo de inclinación de 14°. Para realizar esto, se necesitó dos tapones, arena fina seca y una vela. Para tener más precisión en el curvado, se hizo imprimir en 3D un codo de 14° de otro material, la cual sirvió de molde visual.

Figura 28

Codo de 14° fabricado manualmente mediante termofusión.



1.15.7. Diámetro de la bomba de ariete

El diámetro de la bomba de ariete se construyó con dos diámetros diferentes: con 1 1/2" y 1". Las dimensiones de la tubería de alimentación, cámara de aire y tubería de descarga, se mantuvo constante. Para la construcción de la bomba de ariete de 1", se utilizó una reducción de 1 1/2" a 1". La reducción se realizó 70 cm antes de llegar a la Tee que sube a la cámara de aire. Cabe precisar que en la figura 29 se está mostrando la bomba de ariete de 1", ya que la construcción de la bomba de ariete de 1 1/2" es similar, pero sin usar una reducción.

Figura 29

Modelo de construcción de la bomba de ariete para diámetros de 1 1/2" y 1".



1.15.8. Cámara de aire

La cámara de aire se determinó en función del diámetro de la tubería de alimentación (ver tabla 5). El material que se utilizó para la construcción ha sido con una tubería de PVC.

$$D_{ca} = 3 \cdot D = 3 \cdot 0.048 = 0.144 \text{ m} = 14.4 \text{ cm}$$

$$H_{ca} = 10 \cdot D = 10 \cdot 0.048 = 48 \text{ cm}$$

Cabe señalar que, para esta investigación, el diámetro de la cámara de aire (D_{ca}) que se utilizó ha sido de 3", y la altura de cámara de aire (H_{ca}) ha sido de 50 cm.

Figura 30

Datos técnicos para el diseño de la cámara de aire.

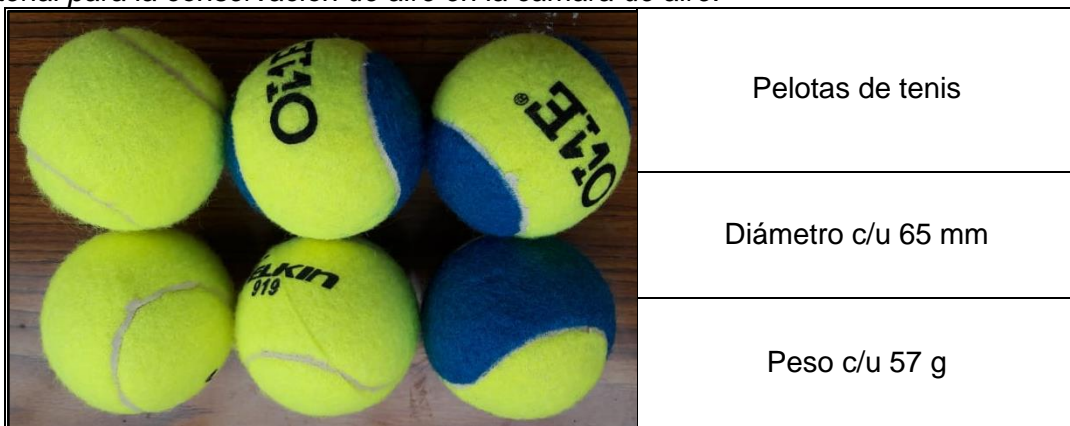
	Tapón de 3"
	Reducción de 3"x1 1/2"
	Adaptador macho de 1 1/2"
	Unión universal de x1 1/2"

1.15.9. Conservación de aire en la cámara de aire

El aire se conservó en la cámara de aire utilizando pelotas de tenis, ya que las pelotas de tenis contienen en su núcleo un gas especial o aire natural, con lo cual se asegura la preservación de aire en la cámara de aire. Cabe precisar que se colocó 4 pelotas de tenis.

Figura 31

Material para la conservación de aire en la cámara de aire.




1.15.10. Válvula de descarga

La válvula de descarga que se utilizó ha sido una válvula tipo Check vertical. Los diámetros de las válvulas de descarga que se utilizó han sido de 1 1/2" y 1".

Figura 32

Detalles técnicos de la válvula check vertical.

	Diámetros de las válvulas Check: 1 1/2" y 1"
Material de bronce	
Un solo sentido del flujo	

1.15.11. Válvula impulsora

En esta investigación se utilizó una válvula impulsora, conocido como válvula de pie con canastilla. Se realizó un orificio con rosca, en el centro de la tapa de la canastilla, de un diámetro de 12 mm. Se realizó un corte conveniente a la canastilla, para aumentar la altura en 3 cm, esto mediante soldadura; esto se hizo con la finalidad de facilitar la operación y mantenimiento durante las pruebas. Originalmente la válvula tiene un eje vertical de bronce, que sobresale del centro de la placa horizontal de la válvula impulsora; en la parte superior de dicho eje vertical, se hizo soldar una arandela de acero con diámetro externo de 2.1 cm.

Figura 33

Características técnicas de construcción de las válvulas impulsoras.

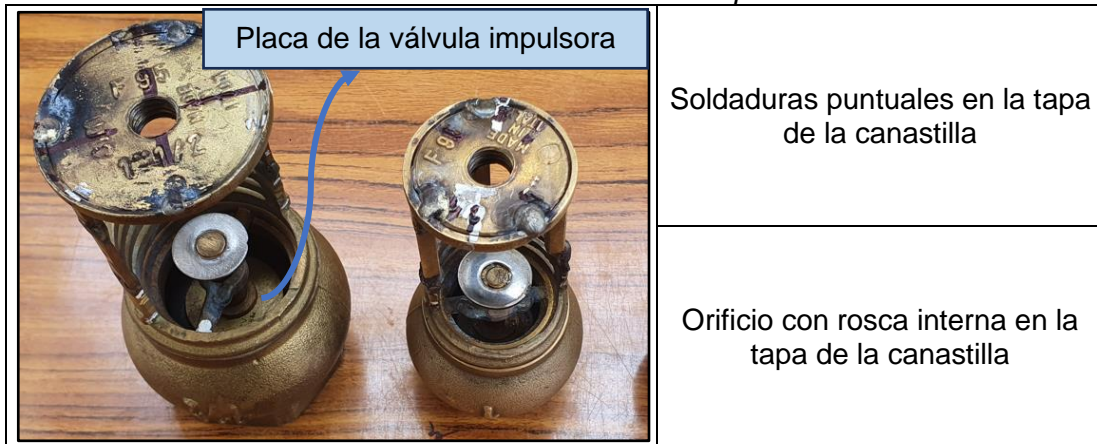


Figura 34

Especificaciones de diseño de las válvulas impulsoras.




1.15.12. Perno hexagonal

El perno hexagonal que se utilizó ha sido una con rosca corrida. La longitud y diámetro del perno hexagonal han sido de 10 cm y 12 mm respectivamente. El diámetro del perno hexagonal coincidió con el diámetro del orificio realizado en la tapa de la canastilla, con el fin de que el perno ingrese por dicho orificio.

Figura 35

Especificaciones técnicas de los pernos, tuercas y arandelas.

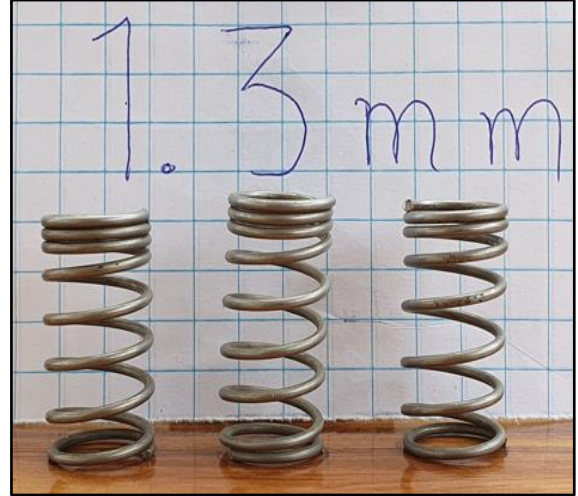
	Código de los pernos y tuercas de acero: A2-70
	Diámetro de perno 12 mm
	Diámetro exterior de las arandelas para la sujeción de las tuercas 2.30 cm

1.15.13. Resorte

El resorte que se utilizó ha sido de compresión y espiral recta. El tipo de material del alambre del resorte ha sido de acero. La longitud del resorte que se utilizó ha sido de 2.50 cm. La luz del resorte ha sido de 4.5 mm. El diámetro del alambre del resorte ha sido de 1.30 mm. El diámetro del resorte se fabricó aproximadamente con el mismo diámetro del perno hexagonal. Asimismo, el resorte se fabricó con tres espiras juntas, con el fin de que enrosque en tres hilos del perno hexagonal, con lo cual, el resorte queda completamente fijo en el perno.

Figura 36

Diseño y especificaciones técnicas de los resortes.

	Resortes de acero
Diámetro de alambre del resorte 1.30 mm	
Luz de resorte 4.5 mm: separación vertical entre dos espirales contiguas	

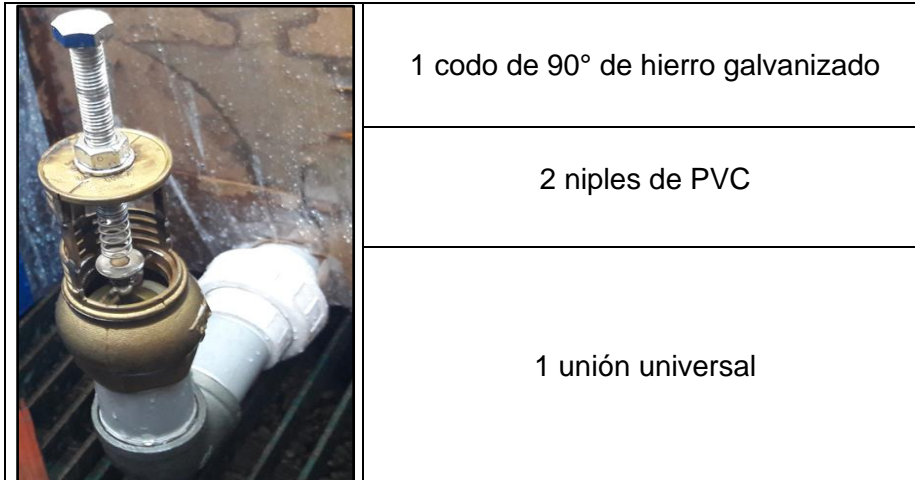
1.15.14. Construcción de la bomba de ariete con diferentes configuraciones de las válvulas impulsoras

1.15.14.1. Construcción de la bomba de ariete convencional.

Este prototipo se construyó con una válvula impulsora. Se utilizó niples de PVC y codos de hierro galvanizado. Los diámetros de la válvula impulsora que se utilizó para la construcción de estos prototipos han sido de 1 1/2" y 1".

Figura 37

Diseño y construcción de la válvula impulsora para una bomba de ariete hidráulico convencional.



1.15.14.2. Construcción de la bomba de ariete hidráulico multipulsor con válvulas impulsoras en serie.

La construcción de estos prototipos se realizó con 2 válvulas impulsoras en serie y 3 válvulas impulsoras en serie, asimismo la construcción se realizó con niples de PVC, Tees de hierro galvanizado y codos de hierro galvanizado. Los diámetros que se utilizó para la construcción de estos prototipos han sido de 1 1/2" y 1". Asimismo, se precisa que solo se está mostrando en la figura 38 y figura 39, la construcción de las configuraciones con 1 1/2", ya que con 1" es similar.

Figura 38

Diseño y construcción de la bomba de ariete hidráulico multipulsor con 2 válvulas impulsoras en serie.

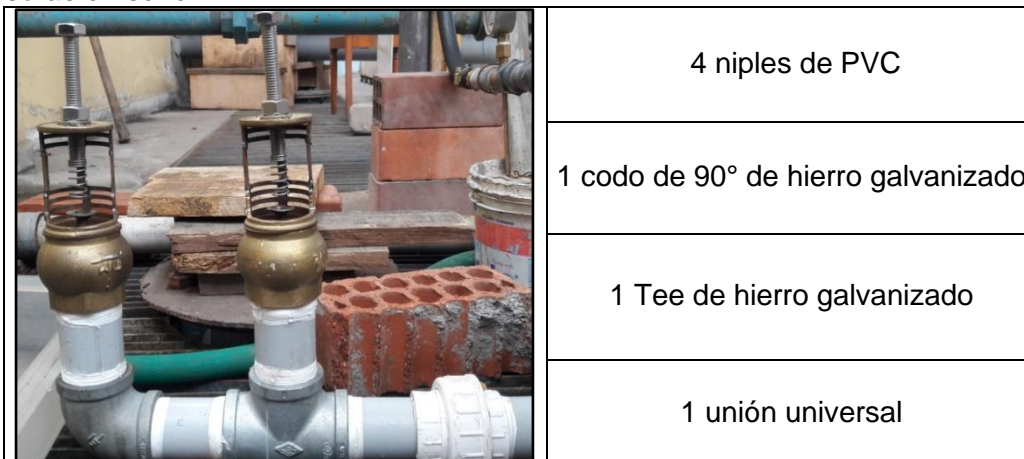
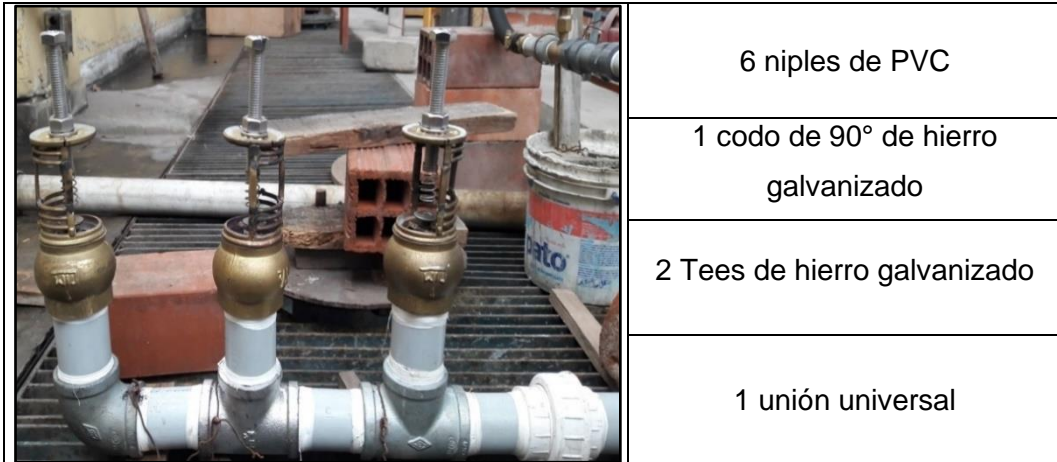


Figura 39

Diseño y construcción de la bomba de ariete hidráulico multipulsor con 3 válvulas impulsoras en serie.



1.15.14.3. Construcción de la bomba de ariete hidráulico multipulsor con válvulas impulsoras en paralelo.

La construcción de esta configuración se realizó con 2 válvulas impulsoras en paralelo y 3 válvulas impulsoras en paralelo. La construcción se realizó con niples de PVC, codos de 90° de hierro galvanizado, Tees de hierro galvanizado y cruz de hierro galvanizado. Para la construcción de cada configuración se utilizó los diámetros de 1 1/2" y 1". Asimismo, se precisa que solo se está mostrando en la figura 40 y figura 41, la construcción de las configuraciones con 1 1/2", ya que con 1" es similar.

Figura 40

Diseño y construcción de la bomba de ariete hidráulico multipulsor con 2 válvulas impulsoras en paralelo.



	5 nipples de PVC
	2 codos de 90° de hierro galvanizado
	1 Tee de hierro galvanizado
	1 unión universal

Figura 41

Diseño y construcción de la bomba de ariete hidráulico multipulsor con 3 válvulas impulsoras en paralelo.

	7 nipples de PVC
	3 codos de 90° de hierro galvanizado
	1 cruz de hierro galvanizado
	1 unión universal

1.15.15. Tubería de descarga

El diámetro de la tubería de descarga se considera como la mitad del diámetro de la tubería de alimentación. La tubería de descarga que se utilizó ha sido una manguera de aire (AIR HOSE) de 3/4", que resiste una presión de 300 PSI (20 BAR). Se utilizó este tipo


de manguera, porque está protegido internamente con lona, por lo tanto, es más difícil que la manguera sufra estrangulaciones, asegurando así los resultados con mayor precisión.

1.15.16. Longitud de la tubería de descarga

La longitud de tubería de descarga que se utilizó ha sido de 12 m. Con esa longitud de manguera se midió el caudal de descarga. La medición se realizó en el piso. Lo ideal es medir en el mismo punto de descarga, pero por las condiciones de laboratorio no era factible.

Figura 42

Construcción y especificaciones técnicas de la línea de descarga.

	Manguera negra de 3/4"
	Presión 20 bar
	Longitud 12 m
	Temperatura -25°C a 80°C

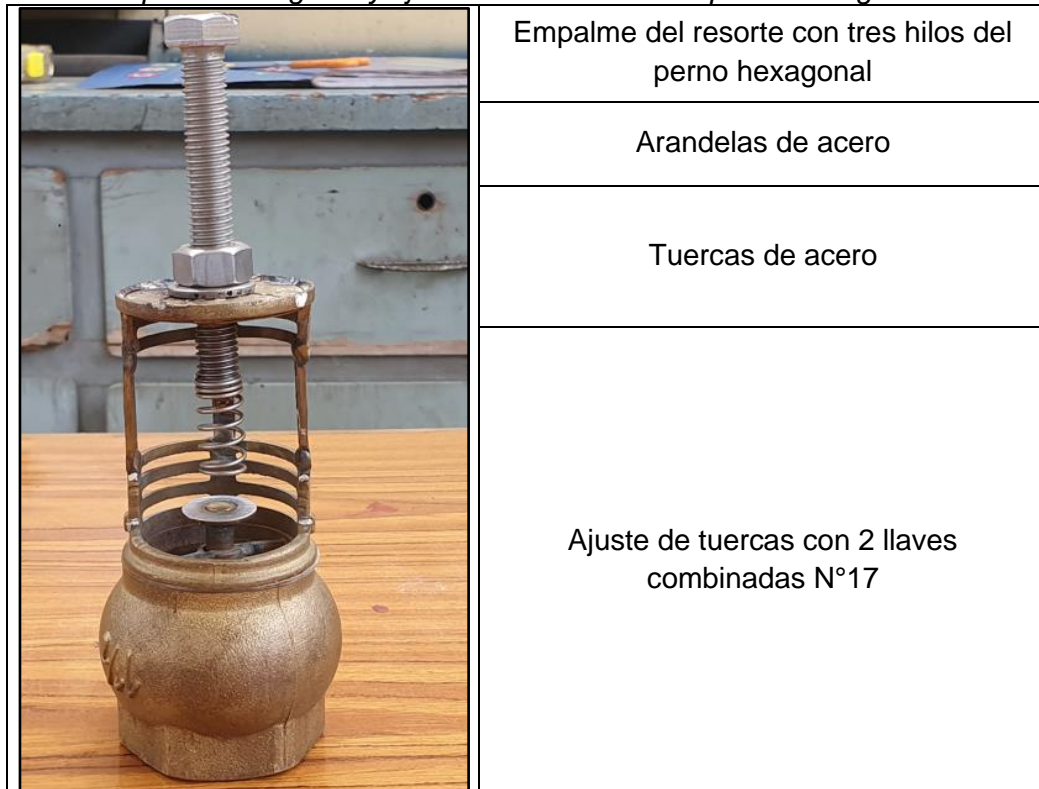
1.16. Procedimiento del desarrollo de las pruebas experimentales

a. Regulación de la carrera del resorte

La regulación de la carrera del resorte se realizó girando el perno hexagonal cada media vuelta, cabe señalar que primero se dividió en dos partes iguales la tapa superior de la canastilla, mediante una línea, con un plumón indeleble; asimismo se rotuló la cabeza del perno hexagonal con una flecha. Tanto la flecha rotulada en la cabeza del perno hexagonal, y la línea de división en la tapa de la canastilla se hicieron coincidir para una carrera del resorte igual a cero. A partir de ese punto de coincidencia, se empezó a girar la flecha del perno hexagonal en sentido horario cada media vuelta. Se realizó la primera prueba, en la primera regulación o el primer giro, siempre en cuando si la bomba de ariete logra funcionar. En cada giro de media vuelta, la carrera del resorte aumentó en 0.86 mm.

Figura 43

Colocación del perno hexagonal y fijación del resorte en el perno hexagonal.



b. Encendido y apagado de la bomba sumergible

Una vez que se reguló la carrera del resorte, se encendió la bomba sumergible para alimentar con agua al tanque elevado. En el instante en que el agua alcanzó una altura de 80 cm en el tanque de alimentación, en ese momento se apagó la bomba sumergible.

Figura 44

Interruptor manual para accionar el encendido y apagado de la bomba sumergible.

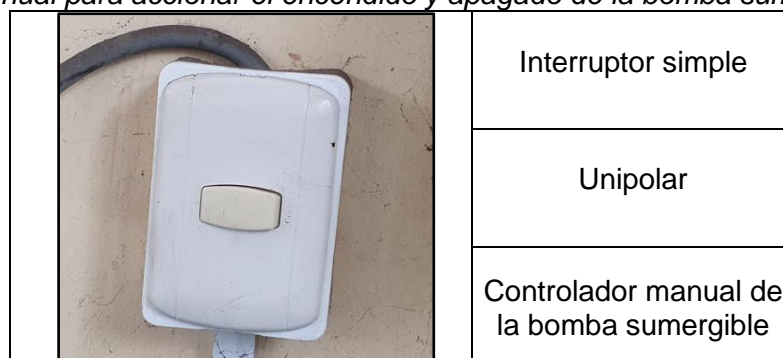


Figura 45

Detalles técnicos de la bomba sumergible.

	Bomba sumergible
	Potencia 0.70 HP
	Caudal máximo 260 L/min
	Altura máxima 10.50 m

c. Accionamiento de la válvula esférica

La válvula esférica se mantuvo cerrada, durante la regulación de la carrera del resorte y el encendido de la bomba sumergible. Después de que se apagó la bomba sumergible, se abrió la válvula esférica. Inmediatamente después, la acción de la fuerza de arrastre del agua, la acción del peso de la placa horizontal de la válvula impulsora y la acción de la fuerza elástica de la carrera del resorte, hicieron que funcione de forma automática la bomba de ariete hidráulico.

Hubo casos donde no se logró hacer funcionar la bomba de ariete, es decir, la placa horizontal de la válvula impulsora permanecía cerrado. Esto aun después que se realizó tres intentos mediante el cierre y apertura de la válvula esférica. En ese caso se accionó el cierre de la válvula esférica, para pasar a realizar la siguiente regulación de la carrera del resorte, es decir, un giro de media vuelta más. Después se repitió los pasos anteriores. En el momento en que se encontró, la carrera del resorte que empezó hacer funcionar a la

bomba de ariete, en ese momento, se encendió la bomba sumergible, y se empezó a realizar las pruebas.

Las pruebas se realizaron hasta que la regulación de la carrera del resorte deja de hacer funcionar a la bomba de ariete, es decir, la placa horizontal de la válvula impulsora permanece abierto.

Figura 46

Válvula esférica de 1 1/2" para cortar el flujo de alimentación a la bomba de ariete.




d. Conservación del nivel constante en el tanque elevado

El nivel de agua constante, en el tanque elevado, se controló con una válvula compuerta de 1 1/2", este se colocó en la tubería de impulsión de 1 1/2" que alimenta al tanque elevado. El nivel constante que se mantuvo ha sido de 3.10 m, esto medido a partir del piso hasta el nivel constante en el tanque de alimentación. El nivel constante se aseguró girando en sentido horario o antihorario la válvula compuerta, dependiendo si el nivel constante ascendía o descendía respectivamente. Esto se realizó durante todas las pruebas para obtener con mayor precisión los resultados de las mediciones. Cabe precisar que la eficiencia se calculó considerando la altura de alimentación hasta el nivel constante.

Figura 47

Válvula compuerta para el control del nivel constante en el tanque de alimentación.

	Colocado después de la bomba sumergible
	Cierre y apertura total con 8 vueltas
	Válvula compuerta de bronce de 1 1/2"

e. Verificación de la presión de salida

La presión de salida se verificó a la salida de bomba de ariete, es decir, al inicio de la tubería descarga, su registro se realizó con una cámara filmadora.

Figura 48

Diseño y datos técnicos del manómetro.

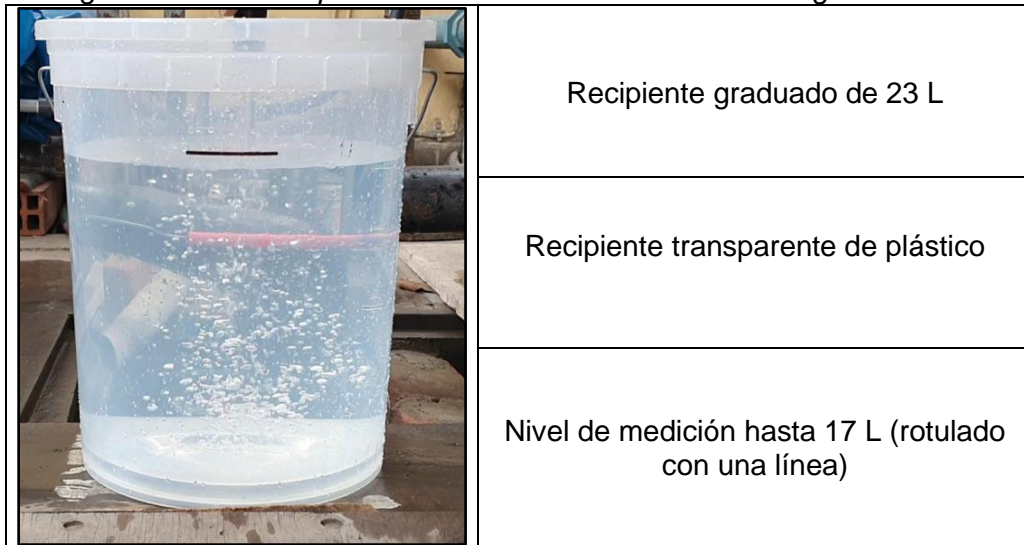
	Manómetro de 100 PSI con glicerina
	Díámetro de orificio en el niple de 1.5 mm para empalme mediante soldadura
	Accesorio de unión del manómetro con el niple: reducción 1/4" hembra x 1/8" macho (adaptador especial para manómetro)

f. Medición del caudal de descarga

El caudal de descarga se hizo llegar hasta una altura de 5 m, pero la medición se realizó a nivel del piso. Para la medición se utilizó el método volumétrico, con un recipiente graduado de 23 L. Se realizó tres mediciones y después se obtuvo un promedio. El registro de la medición se realizó mediante la filmación con una cámara de video, y después se obtuvo el resultado con la ayuda del programa Wondershare Filmora 11, ya que este programa cuenta con un cronómetro integrado.

Figura 49

Recipiente graduado de 23 L para la medición del caudal de descarga.



g. Medición del caudal perdido

Para la medición del caudal perdido, primero se captó el caudal perdido con una caja de madera de 0.5mx0.5mx0.4m, forrada con plástico, después el flujo paso a un recipiente transparente de 42cmx46.5cmx10cm. Luego el flujo perdido, se transportó con una tubería de PVC de 2" de 1.80 m y una manguera dúplex de 1" de 1.60 m, hasta la tapa de la cisterna, punto en el cual se realizó la medición. El caudal perdido se determinó con el método volumétrico, con dos recipientes graduados de 12 L y 23 L. El recipiente de 12 L se utilizó cuando el caudal perdido no generaba mucha turbulencia. El recipiente de 23 L se utilizó cuando el caudal perdido generaba mucha turbulencia. Se realizó tres mediciones, y después se obtuvo un promedio. La medición se registró mediante la filmación con una cámara de video, luego se obtuvo el resultado con la ayuda del programa Wondershare Filmora 11, ya que este programa posee un cronometro integrado.

Figura 50

Captación del caudal perdido.



Figura 51

Conducción del caudal perdido al punto de medición.



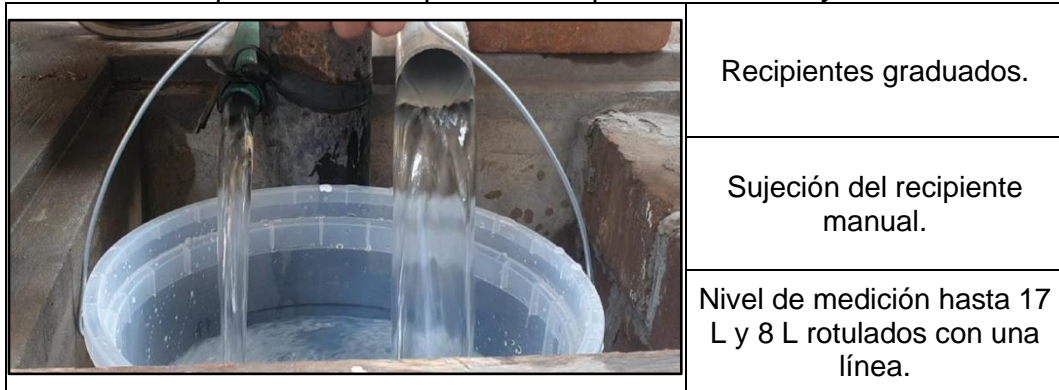
Caja de 0.5mx0.5mx0.4m forrada con plástico

Recipiente transparente de 42cmx46.5cmx10cm

Tubería de PVC de 2" y manguera dúplex de 1"

Figura 52

Medición del caudal perdido con recipientes transparentes de 23 L y 12 L.



1.17. Población y muestra

1.17.1. Población

La población de esta investigación son los parámetros hidráulicos finitos del sistema de funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico.

1.17.2. Muestra

La muestra de esta investigación son los siguientes parámetros de la bomba de ariete hidráulico: carrera del resorte, número de válvulas impulsoras, configuración de las válvulas impulsoras en serie, configuración de las válvulas impulsoras en paralelo y diámetro de la bomba de ariete. Mediante la variación de estos parámetros se ha realizado un total de 45 pruebas.

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

En el presente capítulo se muestra los resultados esperados, calculado, antes de realizar las pruebas. Se muestra los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio de todos los prototipos de la bomba de ariete hidráulico de diámetro de 1 1/2" y diámetro de 1". Asimismo, se analiza y discute los resultados obtenidos. También, se compara los resultados experimentales de esta investigación, con resultados de otros autores.

1.18. Cálculo de la eficiencia esperada según las dimensiones de la bomba de ariete instalada en el LNH

En este apartado se determina la eficiencia que se espera obtener después de realizar las pruebas experimentales. Para ello se utiliza el siguiente manual de campo: Use of Hydraulic Rams in Nepal, escrito por el Silver (1977).

Tabla 6

Resumen de las dimensiones de la bomba de ariete instalada en el LNH.

Parámetro	Resultado
Altura de alimentación(H) en m	3.1
Altura de descarga(h) en m	5
Diámetro de la tubería de alimentación en pulg	1 1/2"
Diámetro de la tubería de descarga en pulg	3/4"

Para estimar la eficiencia, hace falta conocer el caudal de alimentación y el caudal de descarga. A continuación, se estimarán esos caudales.

1.18.1. Estimación del caudal de alimentación

Según Silver (1977), el caudal de alimentación mínima y máxima para una tubería de alimentación, de una pulgada y media, es de 15 L/min y 57 L/min respectivamente, tal como muestra la tabla 7.

Tabla 7

Cantidades mínimas y máximas de caudal de alimentación de acuerdo con el diámetro de la tubería de alimentación (Silver, 1977).

Diámetro de la tubería de alimentación (pulg)	Caudal de alimentación mínima(L/min)	Caudal de alimentación máxima(L/min)
1"	8	38
1 1/2"	15	57
2"	30	95
2 1/2"	57	151
3"	95	265
4"	151	379

1.18.2. Estimación del caudal de descarga

Según Silver (1977), el caudal de descarga que se puede obtener, con un diámetro de tubería de descarga de 3/4" es de 6.25 L/min, tal como se puede observar en la tabla 8.

Tabla 8

Caudal de descarga esperada según el diámetro de la tubería de descarga (Silver, 1977).

Diámetro de la tubería de descarga en pulg	Caudal de descarga en L/min
1/2	2.08
3/4	6.25
1	9.72
1 1/4	15.97
1 1/2	38.19
2	62.5
3	93.75

1.18.3. Cálculo de la eficiencia esperada

El cálculo de la eficiencia se realiza según D'Aubuisson, ver la ecuación 41.

1.18.3.1. Cálculo de la eficiencia esperada con el caudal de alimentación mínima.

Según Silver (1977), el caudal de alimentación (Q_a) mínimo para una tubería de alimentación de 1 1/2" es de 15 L/min, ver la tabla 7.

Tabla 9

Estimación de la eficiencia esperada máxima con las dimensiones instaladas en el LNH.

Eficiencia esperada máxima	
H(m)	3.10
h(m)	5
Q_a (L/min)	15
q(L/min)	6.25
n_{\max} .esperada	67.20%

1.18.3.2. Cálculo de la eficiencia esperada con el caudal de alimentación máxima.

Según Silver (1977), el caudal de alimentación (Q_a) máxima para una tubería de alimentación de 1 1/2" es de 57 L/min, ver la tabla 7.

Tabla 10

Estimación de la eficiencia esperada mínima con las dimensiones instaladas en el LNH.

Eficiencia esperada mínima	
H(m)	3.1
h(m)	5
Q_a (L/min)	57
q(L/min)	6.25

$n_{\text{min.}} \text{esperada}$	17.69%
-----------------------------------	--------

1.19. Resultados obtenidos en el LNH de la bomba de ariete hidráulico de diámetro de 1 1/2"

A continuación, se muestra los resultados obtenidos de todos los prototipos de 1 1/2". La cantidad de pruebas de cada prototipo depende del número de funcionamientos que se ha encontrado con las regulaciones del resorte, es decir, desde que empieza a funcionar hasta el último funcionamiento de la bomba de ariete.

Tabla 11

Resultados de la bomba de ariete hidráulico de diámetro de 1 1/2" con 1 válvula impulsora.

N° DE PRUEBA	CARRERA DEL RESORTE (mm)	ALTURA DE ALIMENTACIÓN (m)	ALTURA DE DESCARGA (m)	CAUDAL DE DESCARGA (L/min)	CAUDAL PERDIDO (L/min)	CAUDAL DE ALIMENTACIÓN (L/min)	EFICIENCIA (%)
1	3.44	3.10	5.00	23.36	17.36	40.72	92.53
2	4.30	3.10	5.00	22.74	17.16	39.90	91.92
3	5.16	3.10	5.00	22.43	17.79	40.22	89.95
4	6.02	3.10	5.00	24.64	17.47	42.11	94.38
5	6.88	3.10	5.00	25.29	17.42	42.71	95.51
6	7.74	3.10	5.00	24.10	17.52	41.62	93.39
7	8.60	3.10	5.00	25.33	24.66	49.99	81.73
8	9.46	3.10	5.00	25.58	38.20	63.78	64.69
9	10.32	3.10	5.00	23.89	55.05	78.94	48.81

Tabla 12

Resultados de la bomba de ariete hidráulico multipulsor de diámetro de 1 1/2" con 2 válvulas impulsoras en serie.

N° DE PRUEBA	CARRERA DEL RESORTE (mm)	ALTURA DE ALIMENTACIÓN (m)	ALTURA DE DESCARGA (m)	CAUDAL DE DESCARGA (L/min)	CAUDAL PERDIDO (L/min)	CAUDAL DE ALIMENTACIÓN (L/min)	EFICIENCIA (%)
1	0.86	3.10	5.00	26.20	54.71	80.91	52.23
2	1.72	3.10	5.00	26.74	53.91	80.65	53.48
3	2.58	3.10	5.00	27.70	54.55	82.25	54.32
4	3.44	3.10	5.00	27.64	56.42	84.06	53.03
5	4.30	3.10	5.00	26.35	56.73	83.08	51.16

Tabla 13

Resultados de la bomba de ariete hidráulico multipulsor de diámetro de 1 1/2" con 3 válvulas impulsoras en serie.

N° DE PRUEBA	CARRERA DEL RESORTE (mm)	ALTURA DE ALIMENTACIÓN (m)	ALTURA DE DESCARGA (m)	CAUDAL DE DESCARGA (L/min)	CAUDAL PERDIDO (L/min)	CAUDAL DE ALIMENTACIÓN (L/min)	EFICIENCIA (%)
1	0.86	3.10	5.00	21.62	105.81	127.43	27.36
2	1.72	3.10	5.00	21.28	101.77	123.05	27.89
3	2.58	3.10	5.00	21.83	102.38	124.21	28.35
4	3.44	3.10	5.00	21.89	106.18	128.07	27.57

Tabla 14

Resultados de la bomba de ariete hidráulico multipulsor de diámetro de 1 1/2" con 2 válvulas impulsoras en paralelo.

N° DE PRUEBA	CARRERA DEL RESORTE (mm)	ALTURA DE ALIMENTACIÓN (m)	ALTURA DE DESCARGA (m)	CAUDAL DE DESCARGA (L/min)	CAUDAL PERDIDO (L/min)	CAUDAL DE ALIMENTACIÓN (L/min)	EFICIENCIA (%)
1	0.86	3.10	5.00	25.42	55.64	81.06	50.58
2	1.72	3.10	5.00	26.63	54.75	81.38	52.78
3	2.58	3.10	5.00	28.06	54.74	82.80	54.66
4	3.44	3.10	5.00	27.59	53.79	81.38	54.68
5	4.30	3.10	5.00	26.12	54.31	80.43	52.38
6	5.16	3.10	5.00	25.78	55.58	81.36	51.11

Tabla 15

Resultados de la bomba de ariete hidráulico multipulsor de diámetro de 1 1/2" con 3 válvulas impulsoras en paralelo.

Nº DE PRUEBA	CARRERA DEL RESORTE (mm)	ALTURA DE ALIMENTACIÓN (m)	ALTURA DE DESCARGA (m)	CAUDAL DE DESCARGA (L/min)	CAUDAL PERDIDO (L/min)	CAUDAL DE ALIMENTACIÓN (L/min)	EFICIENCIA (%)
1	0.86	3.10	5.00	25.22	66.27	91.49	44.46
2	1.72	3.10	5.00	23.30	76.78	100.08	37.55
3	2.58	3.10	5.00	24.41	84.58	108.99	36.12
4	3.44	3.10	5.00	24.84	84.60	109.44	36.61
5	4.30	3.10	5.00	21.47	86.95	108.42	31.94

1.20. Resultados obtenidos en el LNH de la bomba de ariete hidráulico de diámetro de 1"

A continuación, se muestra los resultados obtenidos de todos los prototipos de la bomba de ariete hidráulico de diámetro de 1". La cantidad de pruebas de cada prototipo depende del número de funcionamientos que se ha encontrado con las regulaciones del resorte, es decir, desde que empieza a funcionar la bomba de ariete hasta el último funcionamiento.

Tabla 16

Resultados de la bomba de ariete hidráulico de diámetro de 1" con 1 válvula impulsora.

N° DE PRUEBA	CARRERA DEL RESORTE (mm)	ALTURA DE ALIMENTACIÓN (m)	ALTURA DE DESCARGA (m)	CAUDAL DE DESCARGA (L/min)	CAUDAL PERDIDO (L/min)	CAUDAL DE ALIMENTACIÓN (L/min)	EFICIENCIA (%)
1	4.30	3.10	5.00	17.80	29.60	47.40	60.57
2	5.16	3.10	5.00	19.01	36.08	55.09	55.66
3	6.02	3.10	5.00	18.38	37.98	56.36	52.60
4	6.88	3.10	5.00	17.07	48.86	65.93	41.76

Tabla 17

Resultados de la bomba de ariete hidráulico multipulsor de diámetro de 1" con 2 válvulas impulsoras en serie.

N° DE PRUEBA	CARRERA DEL RESORTE (mm)	ALTURA DE ALIMENTACIÓN (m)	ALTURA DE DESCARGA (m)	CAUDAL DE DESCARGA (L/min)	CAUDAL PERDIDO (L/min)	CAUDAL DE ALIMENTACIÓN (L/min)	EFICIENCIA (%)
1	0.86	3.10	5.00	19.88	15.02	34.90	91.88
2	1.72	3.10	5.00	20.41	13.79	34.20	96.26
3	2.58	3.10	5.00	19.65	15.53	35.18	90.09

Tabla 18

Resultados de la bomba de ariete hidráulico multipulsor de diámetro de 1" con 3 válvulas impulsoras en serie.

N° DE PRUEBA	CARRERA DEL RESORTE (mm)	ALTURA DE ALIMENTACIÓN (m)	ALTURA DE DESCARGA (m)	CAUDAL DE DESCARGA (L/min)	CAUDAL PERDIDO (L/min)	CAUDAL DE ALIMENTACIÓN (L/min)	EFICIENCIA (%)
1	0.86	3.10	5.00	19.29	26.58	45.87	67.83
2	1.72	3.10	5.00	19.95	26.13	46.08	69.83
3	2.58	3.10	5.00	19.70	29.28	48.98	64.87

Tabla 19

Resultados de la bomba de ariete hidráulico multipulsor de diámetro de 1" con 2 válvulas impulsoras en paralelo.

N° DE PRUEBA	CARRERA DEL RESORTE (mm)	ALTURA DE ALIMENTACIÓN (m)	ALTURA DE DESCARGA (m)	CAUDAL DE DESCARGA (L/min)	CAUDAL PERDIDO (L/min)	CAUDAL DE ALIMENTACIÓN (L/min)	EFICIENCIA (%)
1	0.86	3.10	5.00	20.03	15.56	35.59	90.77
2	1.72	3.10	5.00	20.54	14.55	35.09	94.41
3	2.58	3.10	5.00	20.38	17.17	37.55	87.54

Tabla 20

Resultados de la bomba de ariete hidráulico multipulsor de diámetro de 1" con 3 válvulas impulsoras en paralelo.

N° DE PRUEBA	CARRERA DEL RESORTE (mm)	ALTURA DE ALIMENTACIÓN (m)	ALTURA DE DESCARGA (m)	CAUDAL DE DESCARGA (L/min)	CAUDAL PERDIDO (L/min)	CAUDAL DE ALIMENTACIÓN (L/min)	EFICIENCIA (%)
1	0.86	3.10	5.00	20.77	22.45	43.22	77.51
2	1.72	3.10	5.00	21.08	22.09	43.17	78.76
3	2.58	3.10	5.00	20.48	24.07	44.55	74.15

1.21. Análisis de los resultados de la eficiencia de los prototipos de la bomba de ariete hidráulico de diámetro de 1 1/2"

En este apartado se analiza la eficiencia, de todos los prototipos de la bomba de ariete hidráulico de diámetro de 1 1/2". Cabe precisar que el análisis e interpretación de los resultados, se realiza en base a desplazamientos de puntos de eficiencia, y desplazamiento de curvas (eficiencia vs. carrera del resorte).

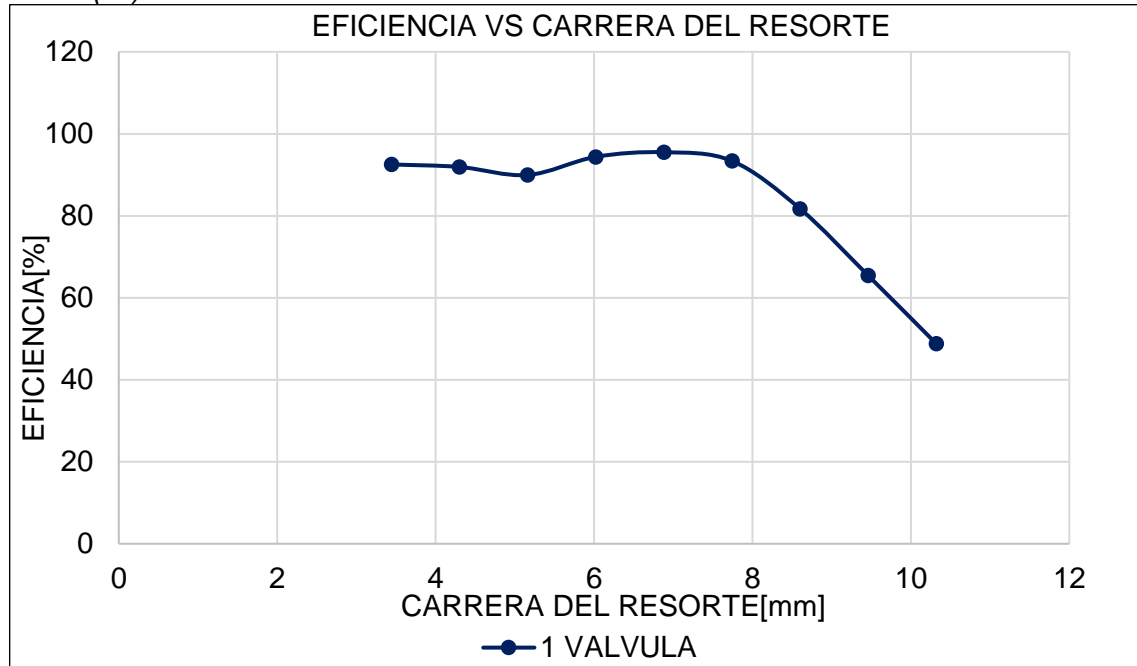
1.21.1. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" en relación con la carrera del resorte(sr)

En este caso se analiza, el impacto que tiene la variación de la carrera del resorte en el comportamiento de la eficiencia. La cantidad de puntos de eficiencia de cada prototipo depende del número de funcionamientos que se ha encontrado con las regulaciones de la carrera resorte.

1.21.1.1. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 1 válvula impulsora.

Figura 53

Eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 1 válvula impulsora respecto a la carrera del resorte (Sr).



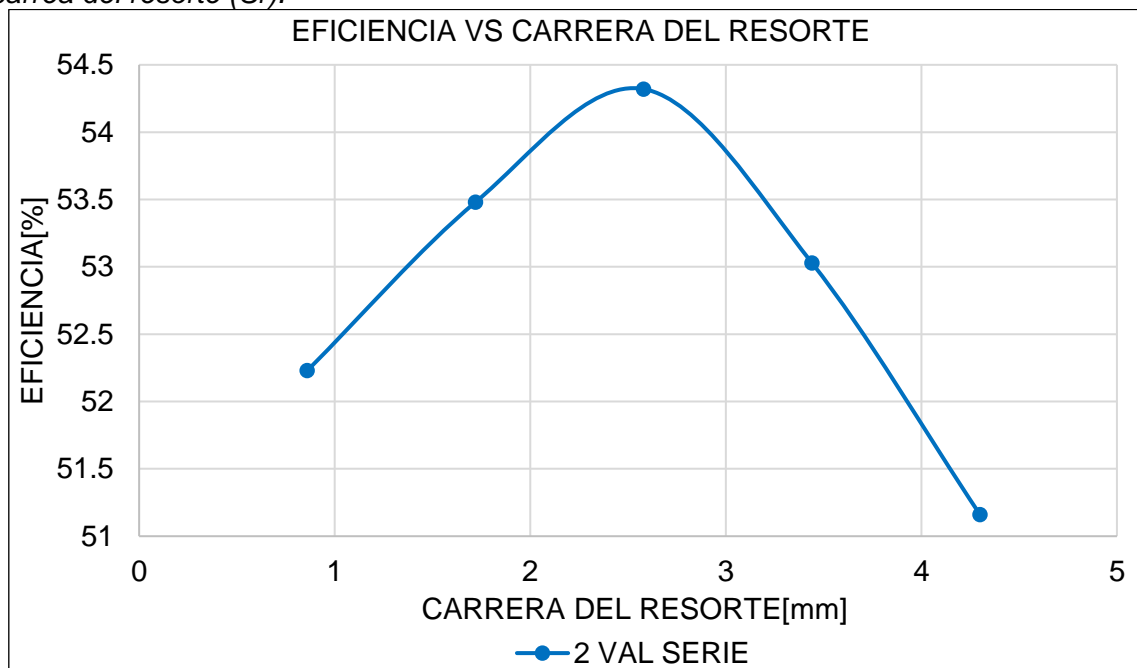
Se está analizando el prototipo de la bomba de ariete con una válvula impulsora. En la figura N° 53 se puede observar que, a partir de la carrera del resorte $S_r = 3.44$ mm hasta $S_r = 5.16$ mm, la eficiencia disminuye; esto ocurre porque el caudal de descarga disminuye, y al mismo tiempo el caudal perdido tiende a aumentar. A partir de la carrera del resorte $S_r = 5.16$ mm hasta $S_r = 6.88$ mm, la eficiencia aumenta; esto ocurre porque el caudal de descarga aumenta, y al mismo tiempo el caudal perdido disminuye. A partir de la carrera del resorte $S_r = 6.88$ mm hasta $S_r = 10.32$ mm, la eficiencia disminuye; esto pasa porque el caudal de descarga tiende a aumentar, y al mismo tiempo el caudal perdido aumenta; pero el aumento del caudal perdido es más considerable. Originándose así la máxima eficiencia para la carrera del resorte $S_r = 6.88$ mm. La cual brinda una eficiencia máxima de 95.51%, con un caudal de descarga de 25.29 L/min, y a una altura de descarga de 5 m.

Por otro lado, en la investigación realizada por Bustamante & Quezada (2009), para una bomba de ariete de 2" con 1 válvula impulsora, consiguieron una eficiencia máxima de 16.43%, con un caudal de descarga de 0.21 L/min, y a una altura de descarga de 48 m. Según la curva que proyectaron, la eficiencia para una altura de descarga de 5 m es de 4.06%, con un caudal de descarga de 0.28 L/min. Asimismo, se precisa que los investigadores regularon la válvula impulsora con pesas, y consideraron el caudal de alimentación constante de 328 L/min.

1.21.1.2. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 2 válvulas impulsoras en serie.

Figura 54

Eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 2 válvulas impulsoras en serie respecto a la carrera del resorte (Sr).



El prototipo que se está analizando es una bomba de ariete con 2 válvulas impulsoras en serie. En la figura N° 54 se observa que, a partir de la carrera del resorte $S_r = 0.86$ mm hasta $S_r = 2.58$ mm, la eficiencia aumenta; esto sucede porque el caudal de descarga aumenta, y al mismo tiempo el caudal perdido tiende a disminuir. A partir de la

carrera del resorte $S_r = 2.58$ mm hasta $S_r = 4.30$ mm, la eficiencia disminuye; esto sucede porque el caudal de descarga disminuye, y al mismo tiempo el caudal perdido aumenta. Generándose así la máxima eficiencia para la carrera del resorte $S_r = 2.58$ mm. La cual posee una eficiencia máxima de 54.32%, con un caudal de descarga de 27.70 L/min, y a una altura de descarga de 5 m.

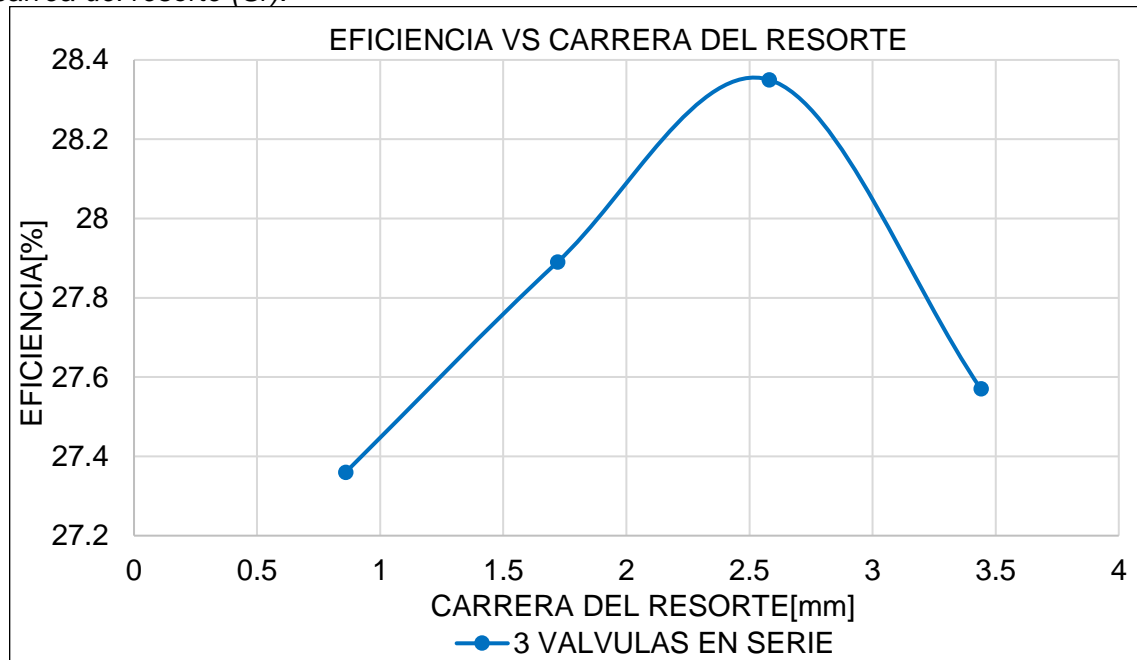
Por otra parte, de acuerdo con la investigación de Bustamante & Quezada (2009), para una bomba de ariete de 2" con 2 válvulas impulsoras en serie, encontraron una eficiencia máxima de 26.57%, con un caudal de descarga de 0.18 L/min, y a una altura de descarga de 50 m. Según la curva que proyectaron, a una altura de descarga de 5 m, obtuvieron una eficiencia de 3.34%, y un caudal de descarga de 0.32 L/min.

Por otro lado, Malca & Quiroz (2016) obtuvieron una eficiencia máxima de 3.80% para una bomba de ariete de 2" con 2 válvulas impulsoras en serie; con un caudal de descarga de 5.7 L/min, y a una altura de descarga de 3.25 m. Asimismo estos autores no consideraron el caudal perdido para el cálculo de la eficiencia, considerando un caudal de alimentación constante de 271 L/min.

1.21.1.3. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 3 válvulas Impulsoras en serie.

Figura 55

Eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 3 válvulas impulsoras en serie respecto a la carrera del resorte (Sr).



El prototipo que se está analizando es una bomba de ariete con 3 válvulas impulsoras en serie. En la figura N° 55 se puede observar que, a medida que la carrera del resorte aumenta, desde $S_r = 0.86$ mm hasta $S_r = 2.58$ mm, la eficiencia aumenta; esto sucede porque el caudal de descarga tiende a aumentar, y el caudal perdido tiende a disminuir. A partir de $S_r = 2.58$ mm hasta $S_r = 3.44$ mm, la eficiencia disminuye; esto sucede porque el caudal de descarga aumenta, y al mismo tiempo el caudal perdido aumenta; pero el caudal perdido aumenta en mayor cantidad que el caudal de descarga. Generándose así la máxima eficiencia para la carrera del resorte $S_r = 2.58$ mm. La cual tiene una eficiencia máxima de 28.35%, con un caudal de descarga de 21.83 L/min, y a una altura de descarga de 5 m.

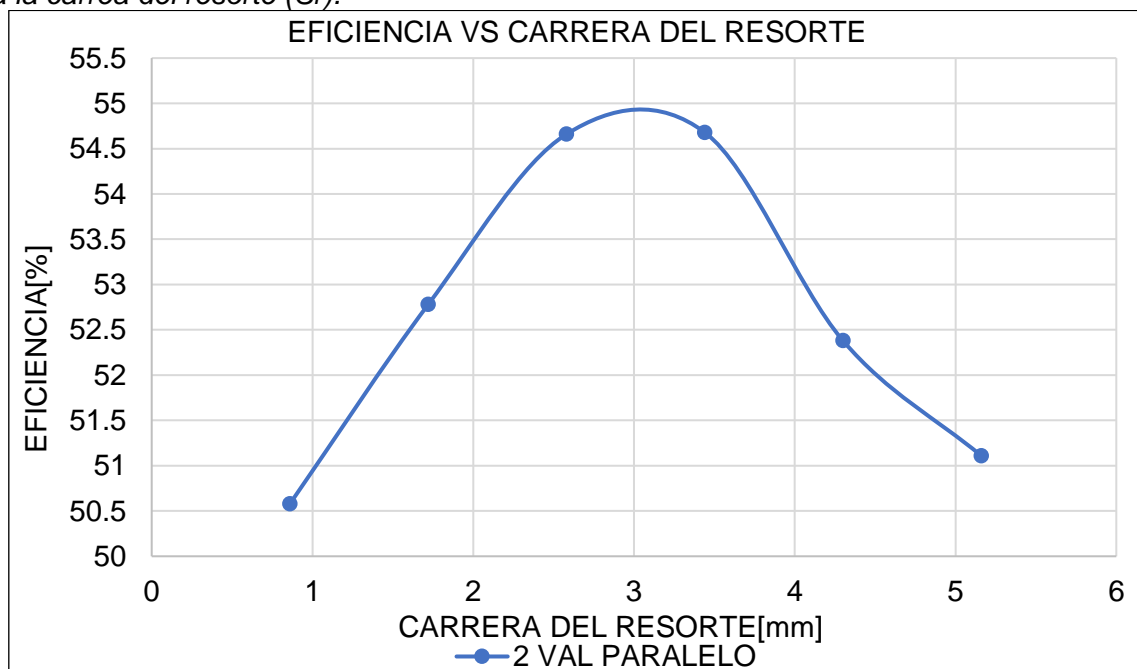
Por otro lado, en la investigación realizada por Galarza (2013), para una bomba de ariete de 2" con 3 válvulas impulsoras en serie, el autor encontró una eficiencia máxima de 28.57%, con un caudal de descarga de 8 L/min, y a una altura de descarga de 2.5 m. Cabe precisar que el autor consideró el caudal de alimentación constante de 70 L/min, además regulo las válvulas impulsoras con pesas.

También los autores Bustamante & Quezada (2009), encontraron una eficiencia máxima de 33.46% para una bomba de ariete de 2" con 3 válvulas impulsoras en serie, con un caudal de descarga de 0.21 L/min, y una altura de descarga de 55 m. Asimismo de acuerdo con la curva que proyectaron, para una altura de descarga de 5 m consiguieron una eficiencia de 5.75%.

1.21.1.4. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 2 válvulas impulsoras en paralelo.

Figura 56

Eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 2 válvulas impulsoras en paralelo respecto a la carrera del resorte (Sr).



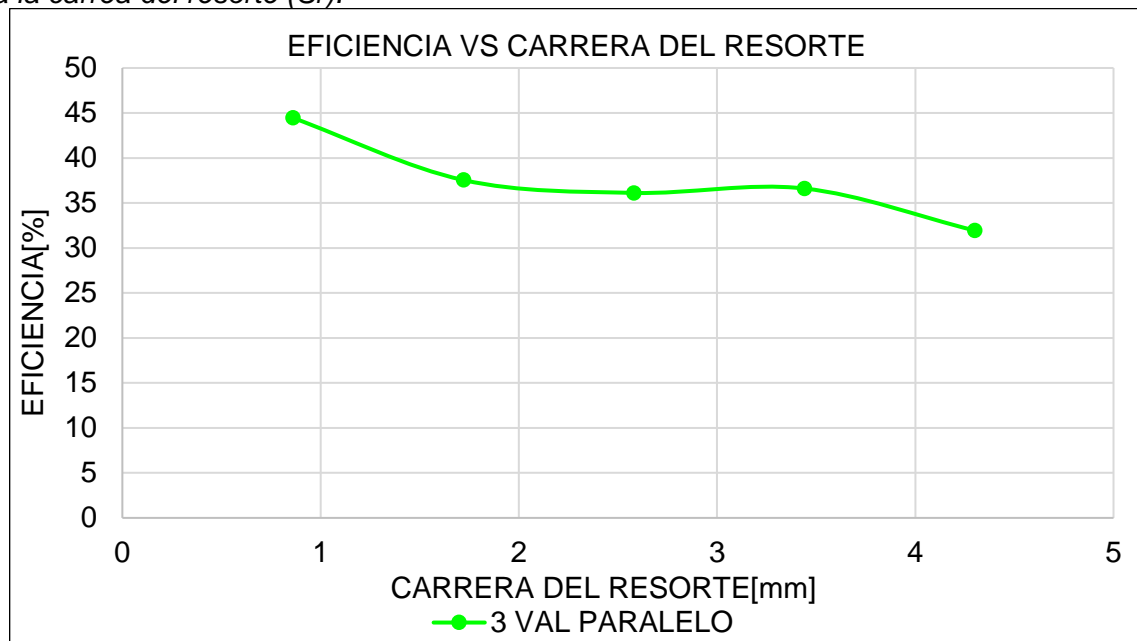
El análisis se está realizando a la bomba de ariete con 2 válvulas impulsoras en paralelo. En la figura N° 56 se puede observar que a partir de la carrera del resorte $S_r = 0.86$ mm hasta $S_r = 3.00$ mm, la eficiencia aumenta; esto sucede porque el caudal de descarga aumenta, y al mismo tiempo el caudal perdido disminuye. A partir de la carrera del resorte $S_r = 3$ mm hasta $S_r = 5.16$ mm, la eficiencia disminuye; esto sucede porque el caudal de descarga disminuye, y al mismo tiempo el caudal perdido aumenta. Originándose así la máxima eficiencia para la carrera del resorte $S_r = 3.00$ mm. La cual brinda una eficiencia máxima de 55%, con un caudal de descarga de 28.09 L/min, y a una altura de descarga de 5 m.

Según la investigación realizada por Malca & Quiroz (2016), para una bomba de ariete de 2" con 2 válvulas impulsoras en paralelo, consiguieron una eficiencia máxima de 3.38%, con un caudal de descarga de 5.1 L/min, y a una altura de descarga de 3.25 m. Cabe mencionar que los autores consideraron el caudal de alimentación constante de 271 L/min, y prescindieron de realizar regulaciones a las válvulas impulsoras.

1.21.1.5. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 3 válvulas impulsoras en paralelo.

Figura 57

Eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 3 válvulas impulsoras en paralelo respecto a la carrera del resorte (Sr).



Se está analizando la bomba de ariete con 3 válvulas impulsoras en paralelo. En la figura 57 se puede observar que, a medida que la carrera del resorte aumenta desde $S_r = 0.86$ mm hasta $S_r = 2.58$ mm, la eficiencia disminuye; esto sucede porque el caudal de descarga tiende a disminuir, y al mismo tiempo el caudal perdido aumenta. A partir de la carrera del resorte $S_r = 2.58$ mm hasta $S_r = 3.44$ mm, la eficiencia aumenta; esto sucede porque el caudal de descarga aumenta, y al mismo tiempo el caudal perdido aumenta; pero el caudal de descarga aumenta en mayor cantidad que el caudal de descarga. A partir de la carrera del resorte $S_r = 3.44$ mm hasta $S_r = 4.30$ mm, la eficiencia disminuye; esto sucede porque el caudal de descarga disminuye, y al mismo tiempo el caudal perdido aumenta. Originándose así la máxima eficiencia para la carrera del resorte $S_r = 0.86$ mm. La cual ofrece una eficiencia máxima de 44.46%, con un caudal de descarga de 25.22 L/min, y a una altura de descarga de 5 m.

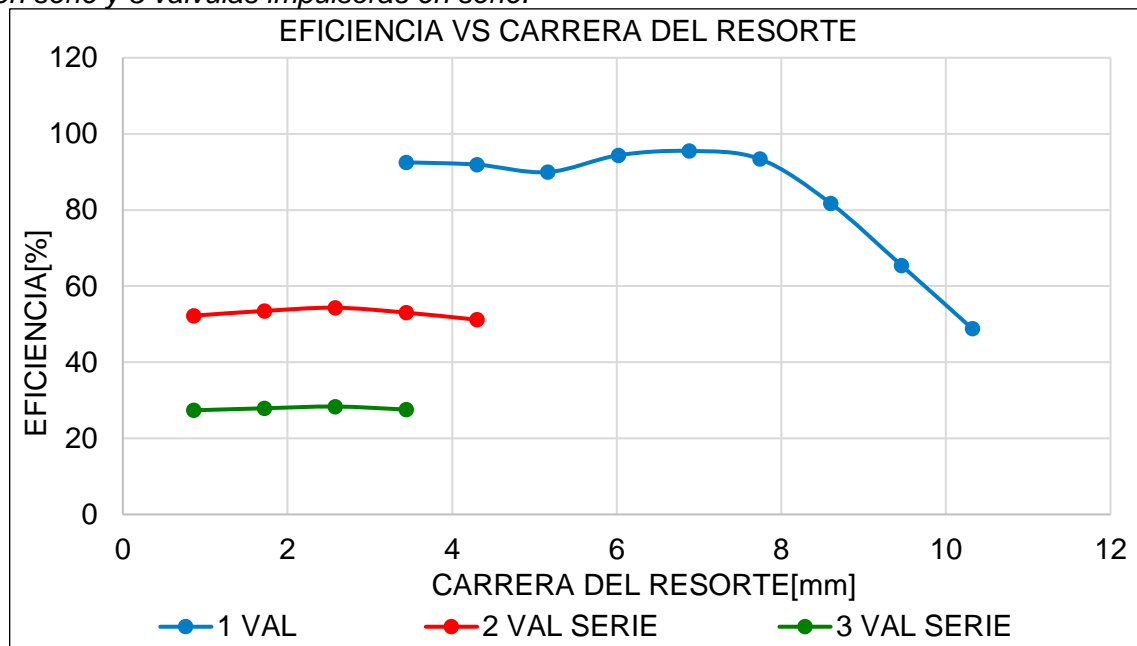
1.21.2. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con relación al número de válvulas impulsoras

En este caso el propósito es analizar el comportamiento de la eficiencia, mediante el desplazamiento de curvas (eficiencia vs. carrera del resorte) para diferentes números de válvulas impulsoras.

1.21.2.1. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 1 válvula Impulsora, 2 válvulas impulsoras en serie y 3 válvulas impulsoras en serie.

Figura 58

Eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 1 válvula impulsora, 2 válvulas impulsoras en serie y 3 válvulas impulsoras en serie.



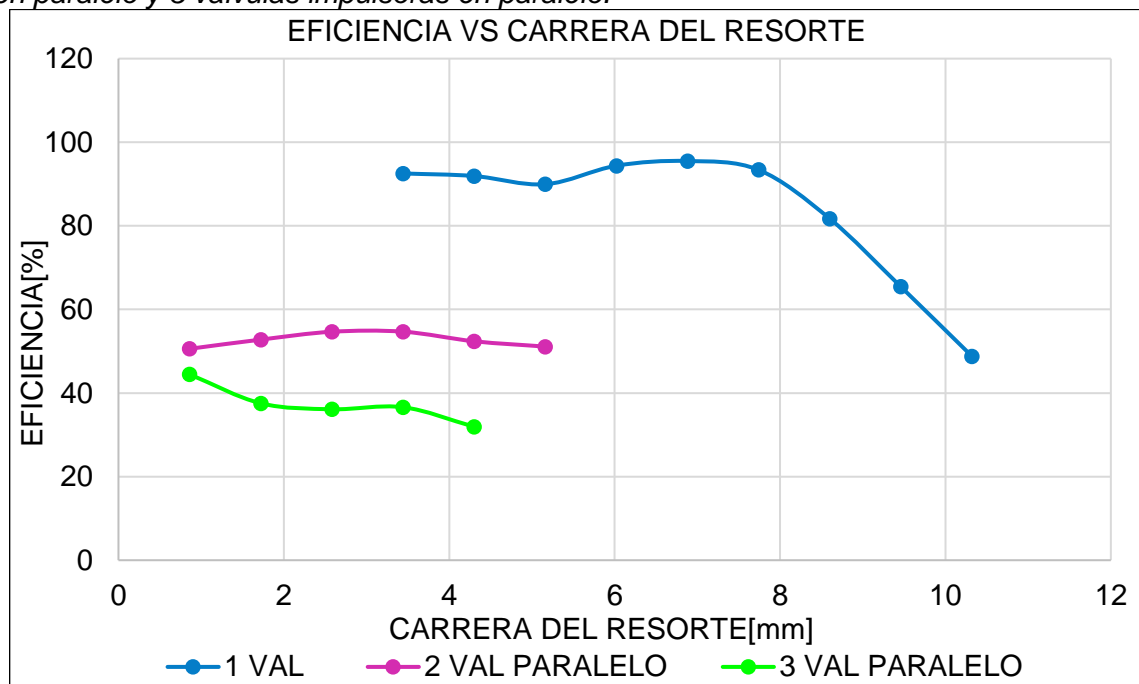
En la figura 58 se puede observar que, a medida que aumenta el número de válvulas impulsoras en serie, la eficiencia disminuye. Esto sucede porque a medida que aumenta el número de válvulas impulsoras en serie, el caudal perdido aumenta considerablemente; por otro lado, el caudal de descarga aumenta y disminuye, pero ligeramente.

Según la investigación de Bustamante & Quezada (2009), estos autores determinaron que a medida que aumenta el número de válvulas impulsoras en serie (1 válvula, 2 válvulas, 3 válvulas), la eficiencia aumenta, es decir, lo que se ha encontrado en esta investigación es lo contrario a lo hallado por los autores. Esto se ha dado porque los autores calcularon la eficiencia, sin tomar en cuenta el caudal perdido para el cálculo de la eficiencia, es decir, consideraron el caudal de alimentación constante.

1.21.2.2. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 1 válvula Impulsora, 2 válvulas impulsoras en paralelo y 3 válvulas impulsoras en paralelo.

Figura 59

Eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 1 válvula impulsora, 2 válvulas impulsoras en paralelo y 3 válvulas impulsoras en paralelo.



En la figura 59 se puede observar que, a medida que aumenta el número de válvulas impulsoras en paralelo, la eficiencia disminuye. Esto sucede porque a medida que aumenta el número de válvulas impulsoras en paralelo, el caudal perdido aumenta

considerablemente; por otro lado, el caudal de descarga aumenta y disminuye, pero en menor cantidad.

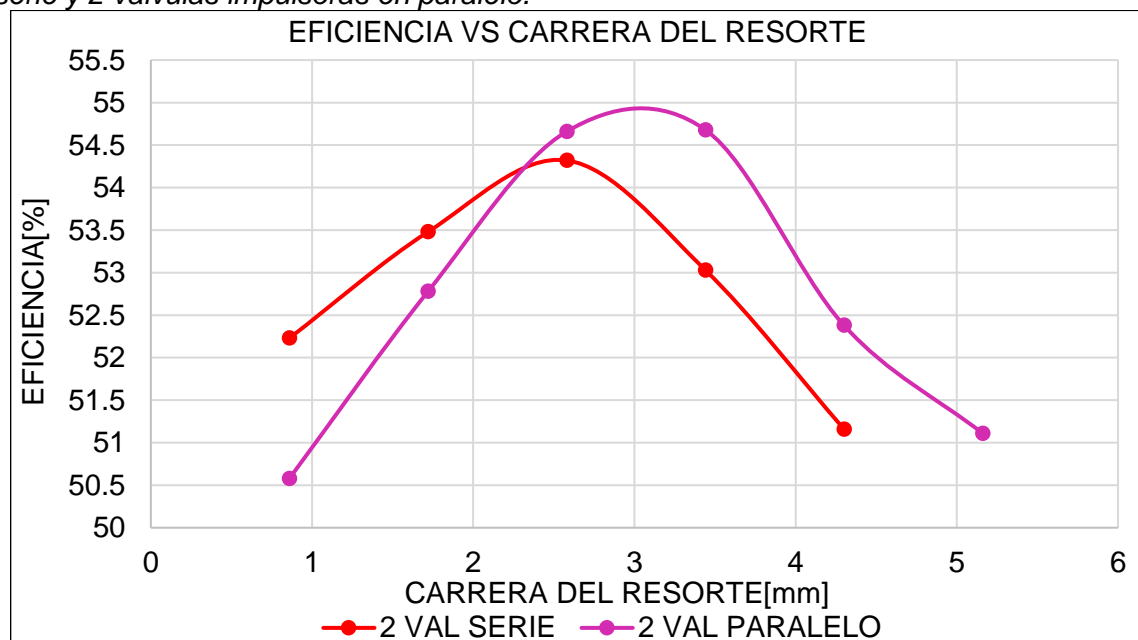
1.21.3. Análisis y comparación de los resultados de la eficiencia para la configuración de las válvulas impulsoras en serie respecto a la configuración de las válvulas impulsoras en paralelo para la bomba de ariete de 1 1/2"

El propósito de este análisis es comparar, el comportamiento de la eficiencia, para la configuración de válvulas impulsoras en serie y para la configuración de las válvulas impulsoras en paralelo.

1.21.3.1. Comparación de los resultados de la eficiencia para la configuración de 2 válvulas impulsoras en serie y 2 válvulas impulsoras en paralelo para la bomba de ariete de 1 1/2".

Figura 60

Comparación de la eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 2 válvulas impulsoras en serie y 2 válvulas impulsoras en paralelo.



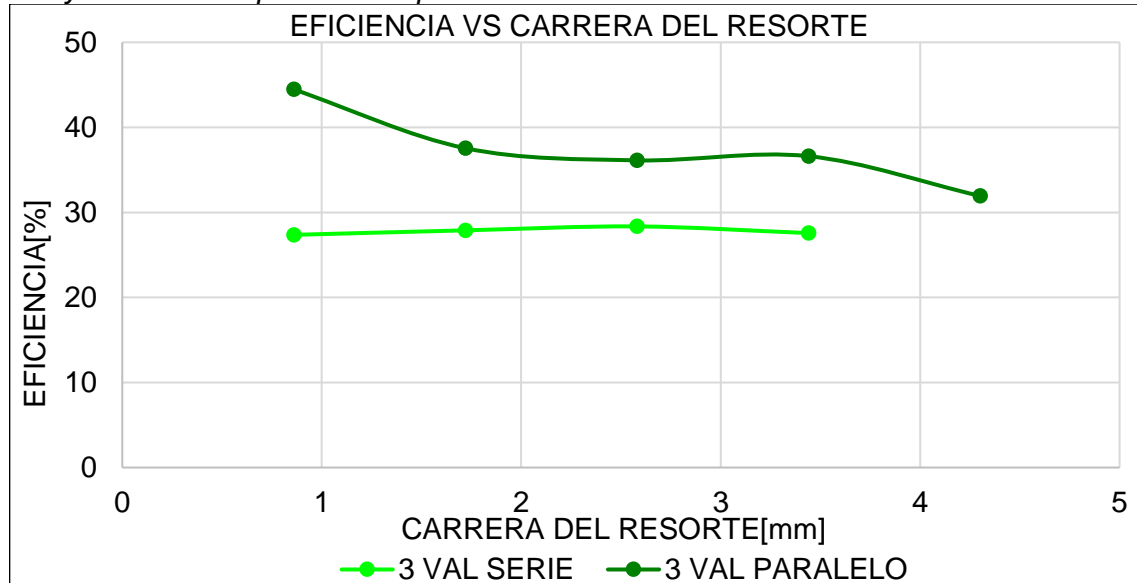
Como se puede apreciar en la figura 60, la eficiencia de la bomba de ariete con 2 válvulas impulsoras en paralelo es ligeramente superior a la eficiencia de la bomba de ariete con 2 válvulas impulsoras en serie, esto considerando las eficiencias máximas. Esto sucede porque el caudal de descarga con 2 válvulas impulsoras en paralelo es ligeramente mayor que con 2 válvulas impulsoras en serie, y al mismo tiempo el caudal perdido de la bomba de ariete con 2 válvulas impulsoras en paralelo es menor que el caudal perdido de la bomba de ariete con 2 válvulas impulsoras en serie. Originándose de esta manera, que la eficiencia máxima para 2 válvulas impulsoras en paralelo es mayor en 1.25% que la eficiencia máxima para 2 válvulas impulsoras en serie.

En la investigación realizada por Malca & Quiroz (2016), los autores encontraron una eficiencia máxima de 3.80% para la bomba de ariete con 2 válvulas impulsoras en serie, y una eficiencia máxima de 3.38% para la bomba de ariete con 2 válvulas impulsoras en paralelo. Determinaron que las máximas eficiencias difieren en 12.42%, siendo en serie la mayor.

1.21.3.2. Comparación de los resultados de la eficiencia para las configuraciones de 3 válvulas impulsoras en serie y 3 válvulas impulsoras en paralelo para la bomba de ariete de 1 1/2".

Figura 61

Comparación de la eficiencia de la bomba de ariete de 1 1/2" con 3 válvulas impulsoras en serie y 3 válvulas impulsoras en paralelo.



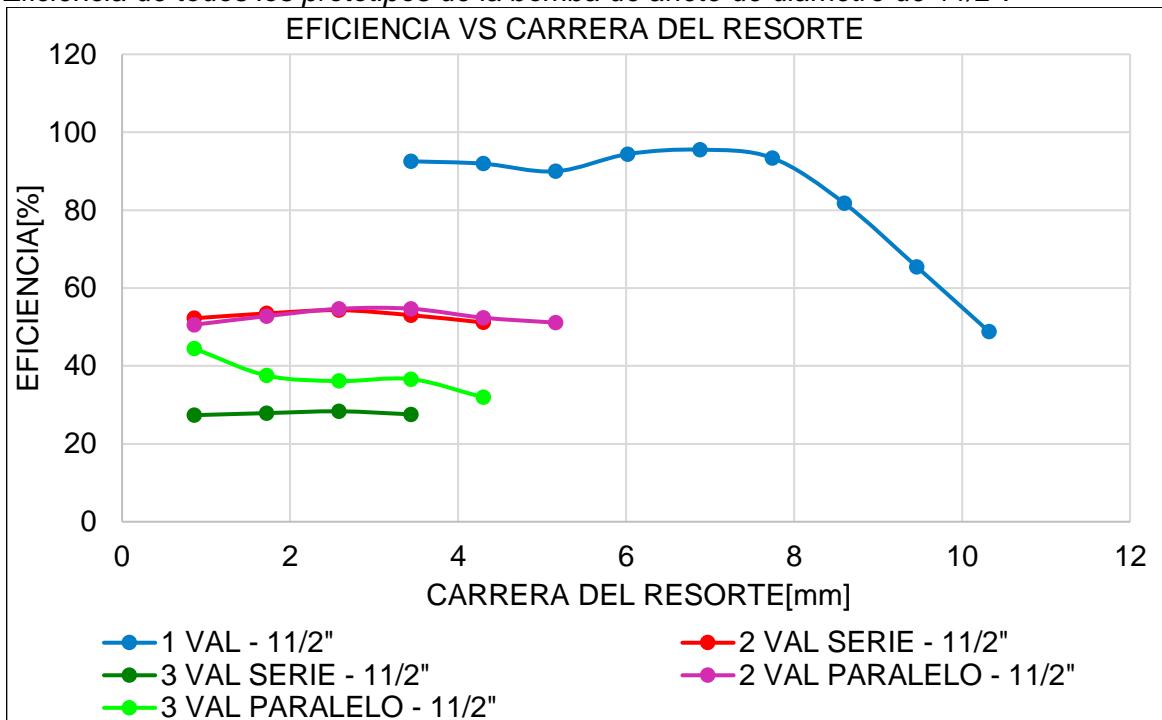
En la figura 61 se puede observar que, la eficiencia de la bomba de ariete con 3 válvulas impulsoras en paralelo es superior a la eficiencia de la bomba de ariete con 3 válvulas impulsoras en serie. Esto sucede porque el caudal de descarga con 3 válvulas impulsoras en paralelo es mayor que con 3 válvulas impulsoras en serie, y al mismo tiempo el caudal perdido para la bomba de ariete con 3 válvulas impulsoras en paralelo es menor que la bomba de ariete con 3 válvulas impulsoras en serie. Generándose así, que la eficiencia máxima de la bomba de ariete con 3 válvulas impulsoras en paralelo es mayor en 56.82 % que la eficiencia máxima de la bomba de ariete con 3 válvulas impulsoras en serie.

1.21.4. Resumen de los resultados de la eficiencia de todos los prototipos de la bomba de ariete hidráulico de 1 1/2"

Este análisis se está realizando, para determinar el prototipo de la bomba de ariete hidráulico de diámetro de 1 1/2" con la mejor eficiencia.

Figura 62

Eficiencia de todos los prototipos de la bomba de ariete de diámetro de 1 1/2".



En la figura 62 se puede observar que, el prototipo con la mejor eficiencia de diámetro de 1 1/2", es la bomba de ariete hidráulico con 1 válvula impulsora. Esto sucede porque este prototipo genera el menor caudal perdido, y a pesar de que no genera el mayor caudal de descarga; el menor caudal perdido influye más en la eficiencia, ya que la variación del caudal de descarga es más ligera. De esta manera, este prototipo ofrece la eficiencia máxima de 95.51%, para una carrera del resorte de 6.88 mm, con un caudal de descarga de 25.29 L/min, y a una altura de descarga de 5 m.

1.22. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de diámetro de 1"

En este apartado se está analizando los resultados, de todos los prototipos de la bomba de ariete hidráulico de diámetro de 1". Cabe precisar que el análisis se realiza en base a desplazamientos de puntos de eficiencia, y desplazamiento de curvas (eficiencia vs. carrera del resorte).

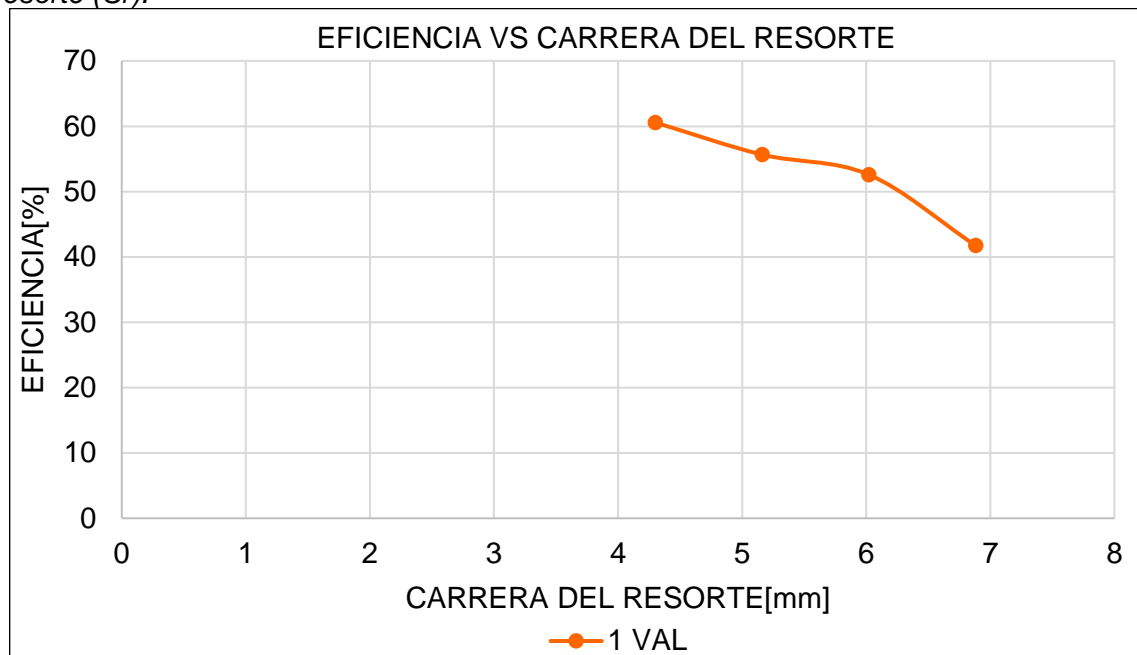
1.22.1. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1" en relación con la carrera del resorte

En este caso se está analizando y discutiendo, los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1", mediante la variación de la carrera del resorte (S_r). El número de puntos de cada curva (eficiencia y carrera del resorte), depende del número de funcionamientos que se ha encontrado con la variación de la carrera del resorte.

1.22.1.1. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 1 válvula impulsora.

Figura 63

Eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 1 válvula impulsora respecto a la carrera del resorte (Sr).



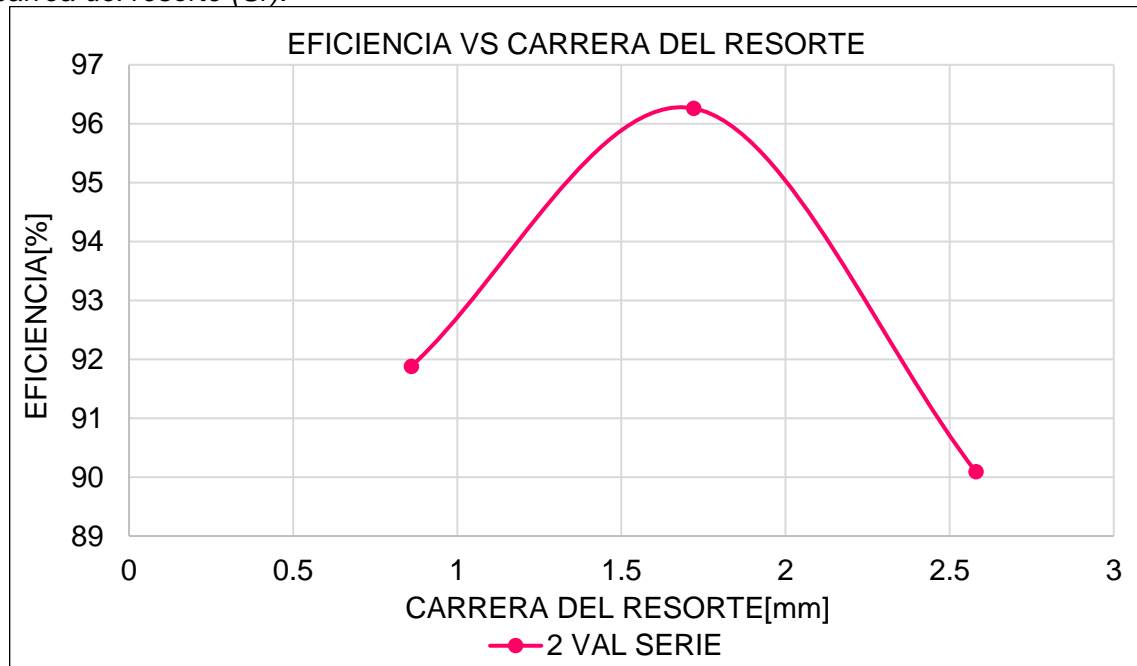
En este caso se está analizando a la bomba de ariete de 1" con una válvula impulsora. En la figura 63 se puede observar que, a medida que la carrera del resorte aumenta, desde $S_r = 4.30$ mm hasta $S_r = 6.88$ mm, la eficiencia disminuye; esto sucede porque el caudal de descarga aumenta, y al mismo tiempo el caudal perdido aumenta; pero el caudal perdido aumenta en mayor cantidad que el caudal de descarga. Originándose así la máxima eficiencia para la carrera del resorte $S_r = 4.30$ mm. La cual proporciona una eficiencia máxima de 60.57%, con un caudal de descarga de 17.80 L/min, y a una altura de descarga de 5 m.

De acuerdo con la investigación de Otí (2017), el autor también realizó la reducción de 1 1/2"x1" para la bomba de ariete, justo en la entrada de la bomba de ariete con lo cual consiguió una eficiencia de 59%, con un caudal de descarga de 4.5 L/min, y a una altura de descarga de 5.30 m. Cabe precisar que el autor desestimó el caudal perdido en el cálculo de la eficiencia.

1.22.1.2. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 2 válvulas impulsoras en serie.

Figura 64

Eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 2 válvulas impulsoras en serie respecto a la carrera del resorte (Sr).



Se está analizando a la bomba de ariete hidráulico multipulsor con 2 válvulas impulsoras en serie. Como se puede apreciar en la figura 64, a partir de la carrera del resorte $S_r = 0.86$ mm hasta $S_r = 1.72$ mm, la eficiencia aumenta; esto sucede porque el caudal de descarga aumenta, y al mismo tiempo el caudal perdido disminuye. A partir de la carrera del resorte $S_r = 1.72$ mm hasta $S_r = 2.58$ mm, la eficiencia disminuye; esto acontece porque el caudal de descarga disminuye, y al mismo tiempo el caudal perdido aumenta. Originándose así la máxima eficiencia para la carrera del resorte $S_r = 1.72$ mm. La cual brinda una eficiencia máxima de 96.26%, con un caudal de descarga de 20.41 L/min, y a una altura de descarga de 5 m.

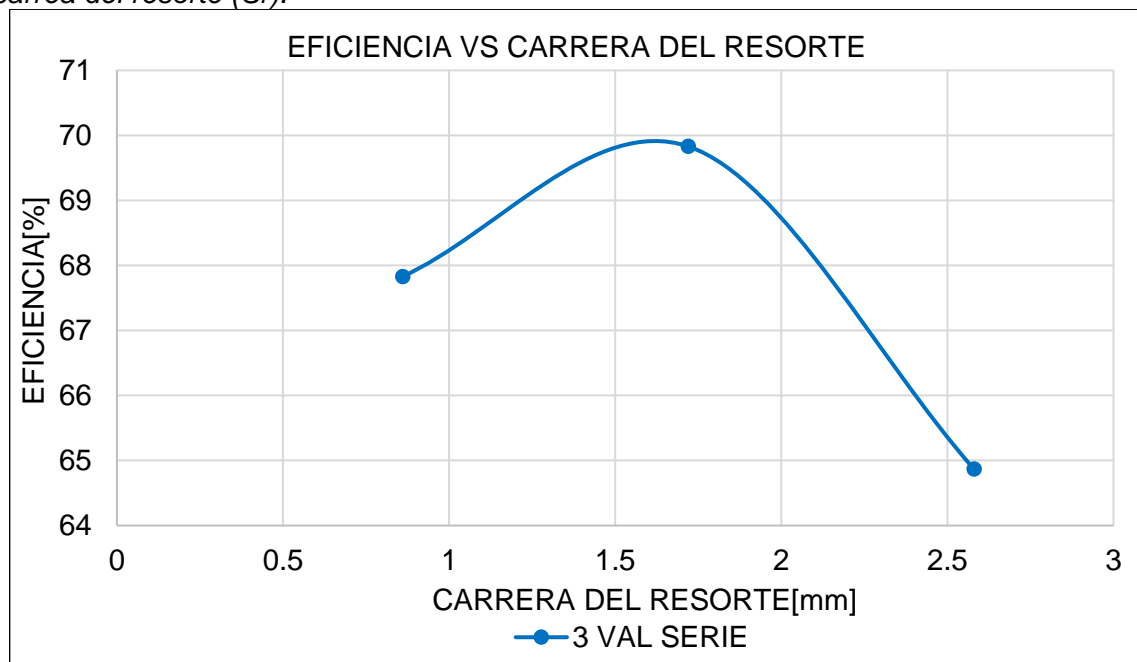
En el caso de la investigación de Jiménez (2019), para una bomba de ariete de 1" con 2 válvulas impulsoras en serie, el autor encontró una eficiencia máxima de 74.79%,

con un caudal de bombeo de 2.66 L/min y presión de salida de 5.49 m.c.a. Cabe mencionar que el autor prescindió de realizar regulaciones a la válvula impulsora.

6.2.1.2. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 3 válvulas impulsoras en serie.

Figura 65

Eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 3 válvulas impulsoras en serie respecto a la carrera del resorte (Sr).



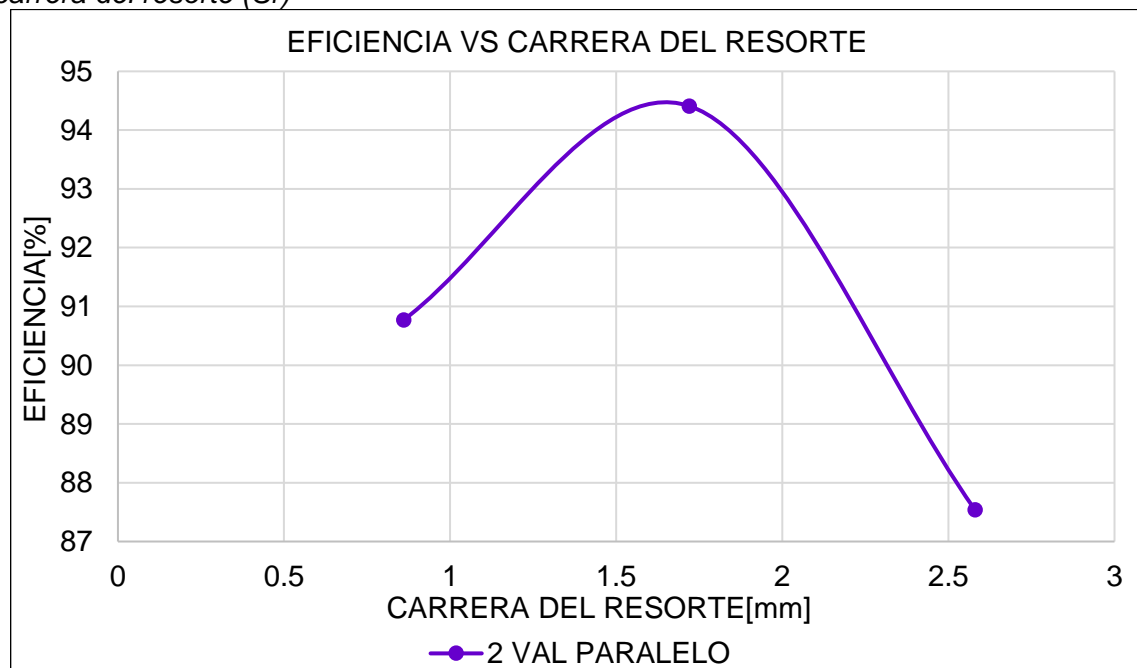
En este caso se está analizando a una bomba de ariete hidráulico multipulsor con 3 válvulas impulsoras en serie. En la figura 65 se puede observar que, a partir de la carrera del resorte $S_r = 0.86$ mm hasta $S_r = 1.72$ mm, la eficiencia aumenta; esto sucede porque el caudal de descarga aumenta, y al mismo tiempo el caudal perdido disminuye. A partir de la carrera del resorte $S_r = 1.72$ mm hasta $S_r = 2.58$ mm, la eficiencia disminuye; esto pasa porque el caudal de descarga disminuye, y al mismo tiempo el caudal perdido aumenta. Originándose así la máxima eficiencia para la carrera del resorte $S_r = 1.72$ mm. La cual proporciona la máxima eficiencia de 69.83%, con un caudal de descarga de 19.95 L/min, y a una altura de descarga de 5 m.

Con respecto a los autores Pizarro & Campoverde (2011), también hicieron una reducción de 2" a 1" a la bomba de ariete, justo antes de llegar a la cámara de aire. Los autores encontraron una eficiencia máxima de 3.05%, con un caudal de descarga de 1 L/min, y a una altura de descarga 40 m. Según la curva que proyectaron, para una altura de descarga de 5 m, consiguieron una eficiencia de 0.78%, y un caudal de descarga de 2.06 L/min. Asimismo, los autores regularon la válvula impulsora utilizando pesas. Por otro lado, los autores consideraron el caudal de alimentación constante de 327 L/min.

1.22.1.3. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 2 válvulas impulsoras en paralelo.

Figura 66

Eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 2 válvulas impulsoras en paralelo respecto a la carrera del resorte (S_r)



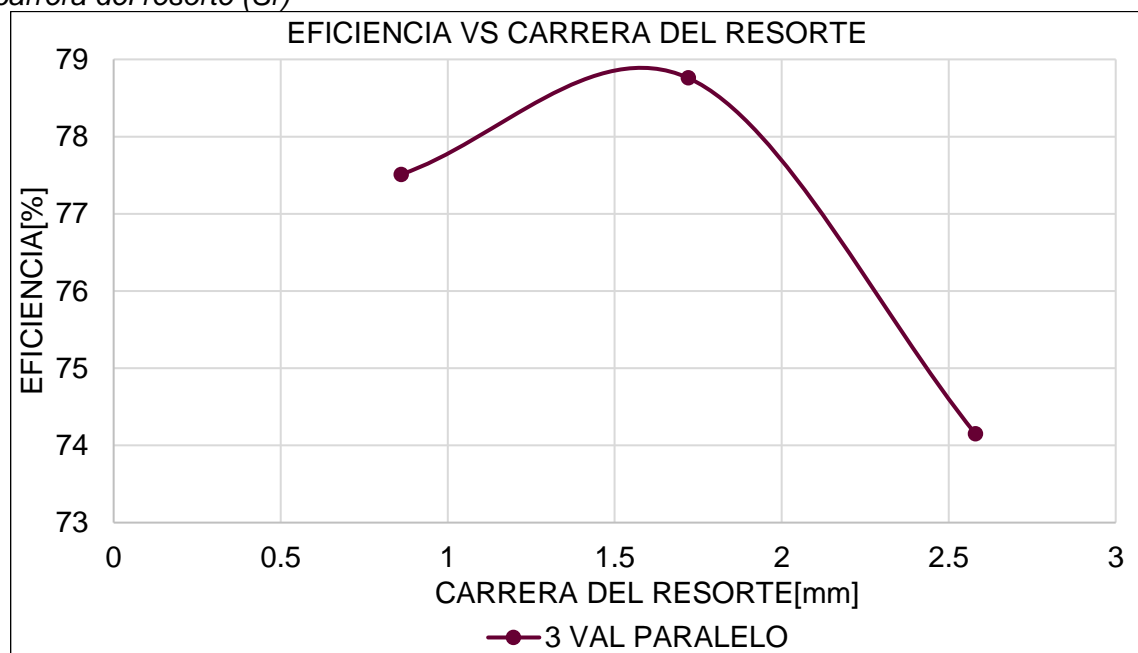
En este caso se está analizando a una bomba de ariete hidráulico multipulsor con 2 válvulas impulsoras en paralelo. En la figura 66 se puede observar que, a partir de la carrera del resorte $S_r = 0.86$ mm hasta $S_r = 1.72$ mm, la eficiencia aumenta; esto ocurre porque el caudal de descarga aumenta, y al mismo tiempo el caudal perdido disminuye. A

partir de $Sr = 1.72$ mm hasta $Sr = 2.58$ mm, la eficiencia disminuye; esto sucede porque el caudal de descarga disminuye, y al mismo tiempo el caudal perdido aumenta. Generándose así la máxima eficiencia para la carrera del resorte $Sr = 1.72$ mm. La cual brinda la máxima eficiencia de 94.41%, con un caudal de descarga de 20.54 L/min, y a una altura de descarga de 5m.

1.22.1.4. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 3 válvulas impulsoras en paralelo.

Figura 67

Eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 3 válvulas impulsoras en paralelo respecto a la carrera del resorte (Sr)



En este caso se está analizando a una bomba de ariete hidráulico multipulsor con 3 válvulas impulsoras en paralelo. En la figura 67 se puede observar que, a partir de la carrera del resorte $Sr = 0.86$ mm hasta $Sr = 1.72$ mm, la eficiencia aumenta; esto ocurre porque el caudal de descarga aumenta, y al mismo tiempo el caudal perdido disminuye. A partir de la carrera del resorte $Sr = 1.72$ mm hasta $Sr = 2.58$ mm, la eficiencia disminuye; esto sucede porque el caudal de descarga disminuye, y al mismo tiempo el caudal perdido

aumenta. Originándose así la eficiencia máxima para la carrera del resorte $S_r = 1.72$ mm. La cual ofrece la máxima eficiencia de 78.76%, con un caudal de descarga de 21.08 L/min, y a una altura de descarga de 5 m.

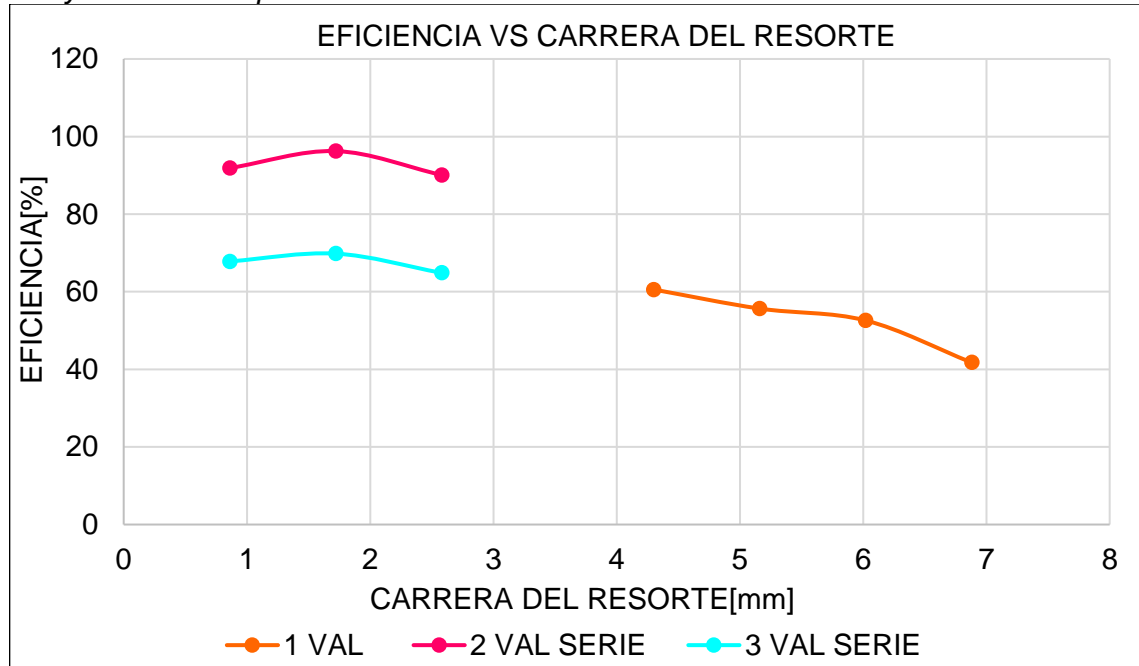
1.22.2. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de diámetro de 1" con relación al número de válvulas impulsoras

En este caso se está analizando la eficiencia, de los prototipos de la bomba de ariete de 1" con diferentes números de válvulas impulsoras. El propósito es evaluar el comportamiento de la eficiencia mediante el desplazamiento de curvas para diferentes números de válvulas impulsoras.

1.22.2.1. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 1 válvula Impulsora, 2 válvulas impulsoras en serie y 3 válvulas impulsoras en serie.

Figura 68

Eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 1 válvula impulsora, 2 válvulas impulsoras en serie y 3 válvulas impulsoras en serie.



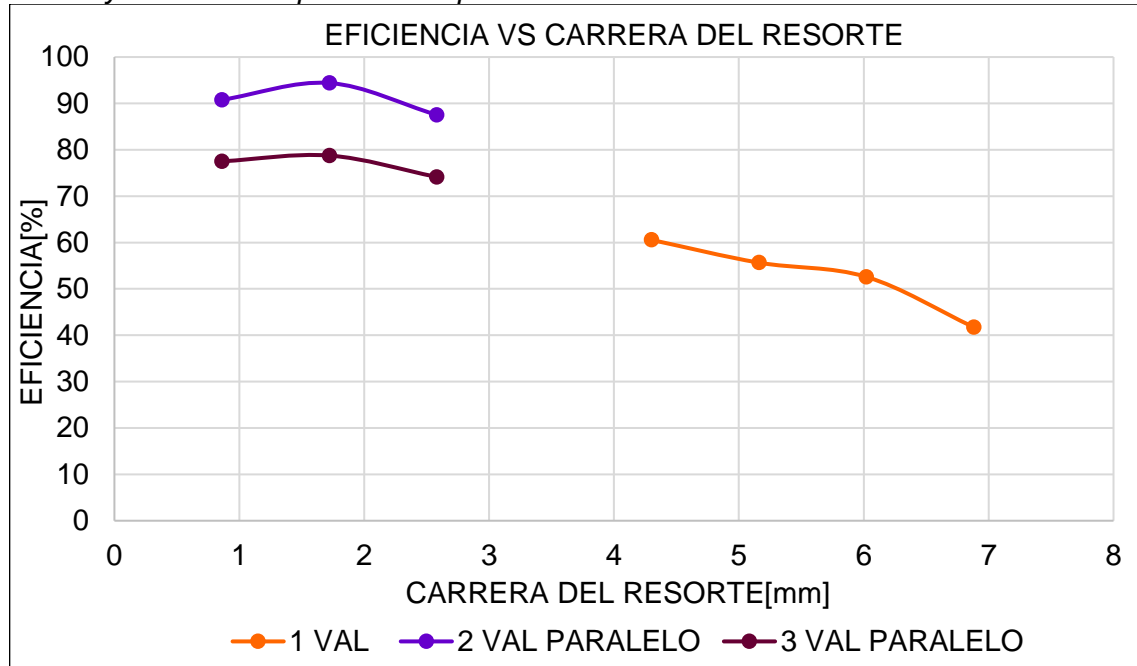
Se puede observar en la figura 68 que, a partir de 1 válvula impulsora, al aumentar a 2 válvulas impulsoras en serie, la eficiencia aumenta; esto sucede porque el caudal descarga aumenta, y el caudal perdido disminuye.

Por otra parte, a partir de 2 válvulas impulsoras en serie, cuando se aumenta a 3 válvulas impulsoras en serie, la eficiencia disminuye; esto sucede porque el caudal de descarga disminuye, y al mismo tiempo el caudal perdido aumenta.

1.22.2.2. Análisis de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 1 válvula impulsora, 2 válvulas impulsoras en paralelo y 3 válvulas impulsoras en paralelo.

Figura 69

Eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 1 válvula impulsora, 2 válvulas impulsoras en paralelo y 3 válvulas impulsoras en paralelo.



En la figura 69 se puede observar que, a partir de 1 válvula impulsora, al aumentar a 2 válvulas impulsoras en paralelo, la eficiencia aumenta; esto sucede porque el caudal de descarga aumenta, y al mismo tiempo el caudal perdido disminuye. Por otro lado, cuando se aumenta, a partir de 2 válvulas impulsoras en paralelo a 3 válvulas impulsoras en paralelo, la eficiencia disminuye; esto sucede porque el caudal de descarga aumenta ligeramente, y al mismo tiempo el caudal perdido aumenta considerablemente.

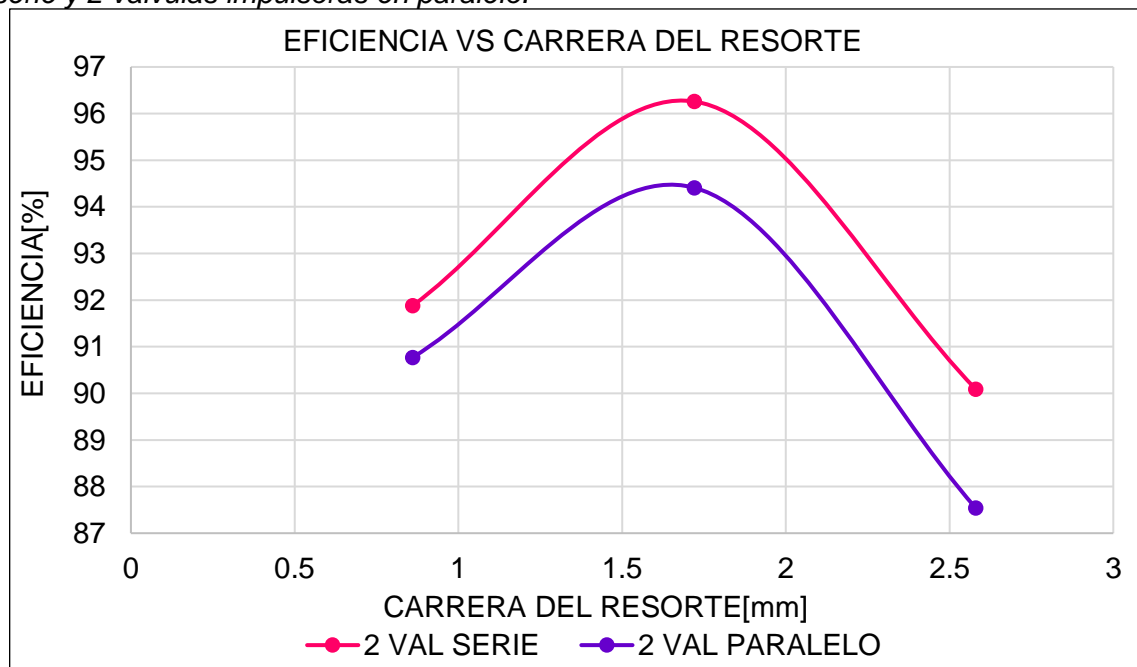
1.22.3. Análisis y comparación de los resultados de la eficiencia para la configuración de las válvulas impulsoras en serie respecto a la configuración de las válvulas impulsoras en paralelo para la bomba de ariete de 1"

El propósito de este análisis es comparar, el comportamiento de la eficiencia, mediante el desplazamiento de curvas, para la configuración de las válvulas impulsoras en serie respecto a la configuración de válvulas impulsoras en paralelo.

1.22.3.1. Comparación de los resultados de la eficiencia para la configuración de 2 válvulas impulsoras en serie respecto a la configuración de 2 válvulas impulsoras en paralelo para la bomba de ariete de 1".

Figura 70

Comparación de la eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 2 válvulas impulsoras en serie y 2 válvulas impulsoras en paralelo.



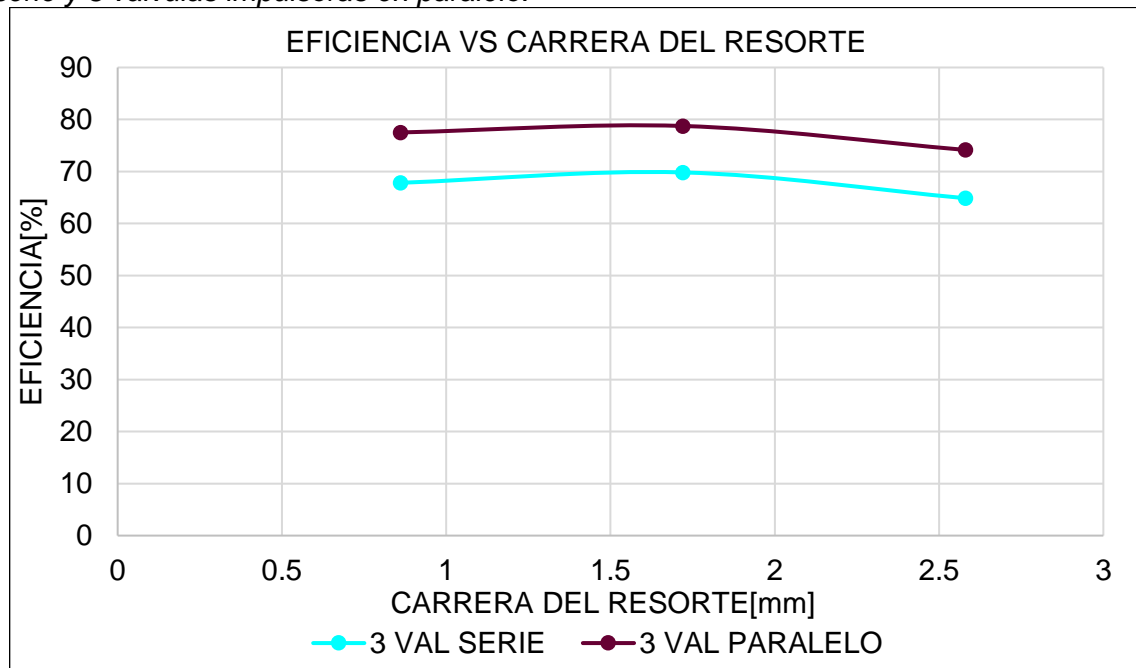
Como se puede apreciar en la figura 70, la eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 2 válvulas impulsoras en serie es ligeramente superior a la eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 2 válvulas impulsoras en paralelo. Esto sucede porque, el caudal de

descarga para 2 válvulas impulsoras en serie es ligeramente menor que para 2 válvulas impulsoras en paralelo, y al mismo tiempo el caudal perdido para 2 válvulas impulsoras en serie es menor que para 2 válvulas impulsoras en paralelo; siendo la variación del caudal perdido en mayor cantidad que el caudal de descarga. Ocurriendo así, que la eficiencia máxima para 2 válvulas impulsoras en serie es mayor en 1.96% que la eficiencia máxima para 2 válvulas impulsoras en paralelo.

1.22.3.2. Comparación de los resultados de la eficiencia para la configuración de 3 válvulas impulsoras en serie respecto a la configuración de 3 válvulas impulsoras en paralelo para la bomba de ariete de 1".

Figura 71

Comparación de la eficiencia de la bomba de ariete de 1" con 3 válvulas impulsoras en serie y 3 válvulas impulsoras en paralelo.



En la figura 71 se puede observar que, la eficiencia de la bomba de ariete con 3 válvulas impulsoras en paralelo es superior a la eficiencia de la bomba de ariete con 3 válvulas impulsoras en serie; esto sucede porque el caudal de descarga para 3 válvulas impulsoras en paralelo es mayor que para 3 válvulas impulsoras en serie, y al mismo

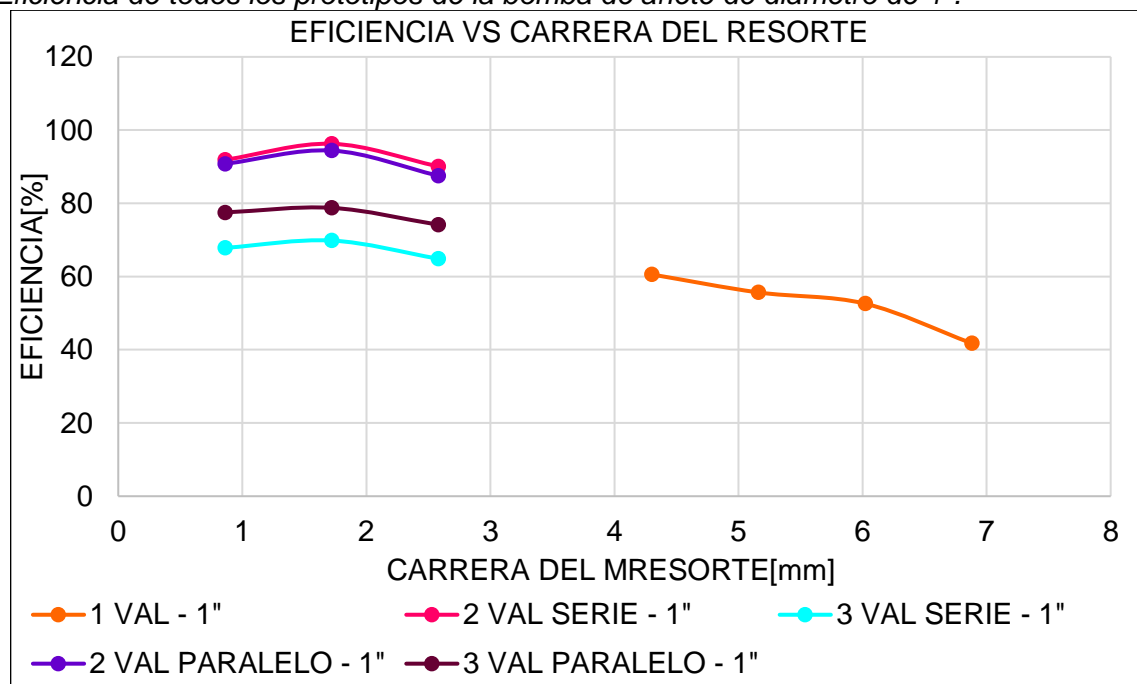
tiempo el caudal perdido para 3 válvulas impulsoras en paralelo es menor que para 3 válvulas impulsoras en serie. Generándose así, que la eficiencia máxima para 3 válvulas impulsoras en paralelo es mayor en 12.79% que la eficiencia máxima para 3 válvulas impulsoras en serie.

1.22.4. Resumen de los resultados de la eficiencia de todos los prototipos de la bomba de ariete hidráulico de diámetro de 1"

En este caso se está analizando la eficiencia de todos los prototipos de la bomba de ariete hidráulico de 1". El propósito es encontrar el prototipo de la bomba de ariete hidráulico de diámetro de 1" con la mejor eficiencia.

Figura 72

Eficiencia de todos los prototipos de la bomba de ariete de diámetro de 1".



En la figura 72 se puede apreciar que la mejor eficiencia de los prototipos de la bomba de ariete de diámetro de 1", es con 2 válvulas impulsoras en serie. Esto sucede porque este prototipo genera el menor caudal perdido, y a pesar de no generar el mayor

caudal de descarga; el caudal perdido influye más en la eficiencia, ya que la variación del caudal de descarga es más ligera. De esta manera este prototipo genera una eficiencia máxima de 96.26%, para la carrera del resorte de 1.72 mm, con un caudal de descarga de 20.41 L/min, y a una altura de descarga de 5 m.

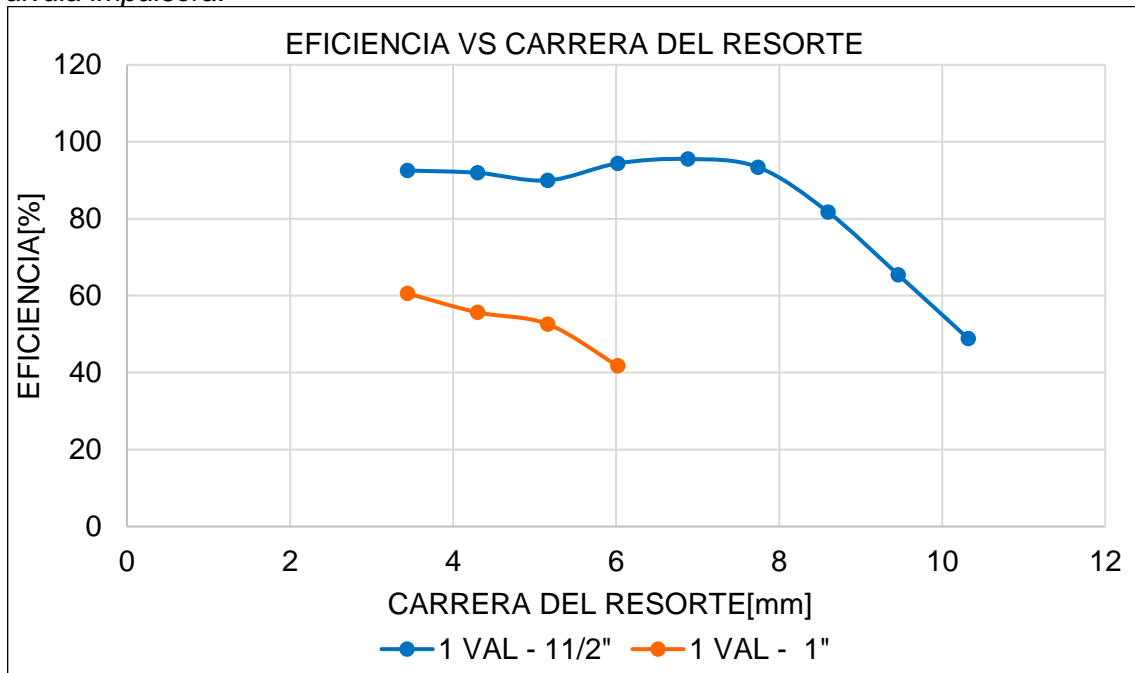
1.23. Análisis y comparación de los resultados de la eficiencia de la bomba de ariete hidráulico de diámetros de 1 1/2" y de 1"

En este análisis se está comparando, las eficiencias de los prototipos de diámetro de 1 1/2" de la figura 53, figura 54, figura 55, figura 56 y figura 57 respecto a las eficiencias de los prototipos de diámetro de 1" de la figura 63, figura 64, figura 65, figura 66 y figura 67.

1.23.1. Comparación de los resultados de la eficiencia para la bomba de ariete de diámetros de 1 1/2" y 1" con 1 válvula impulsora

Figura 73

Comparación de la eficiencia para la bomba de ariete de diámetros de 1 1/2" y 1" con 1 válvula impulsora.

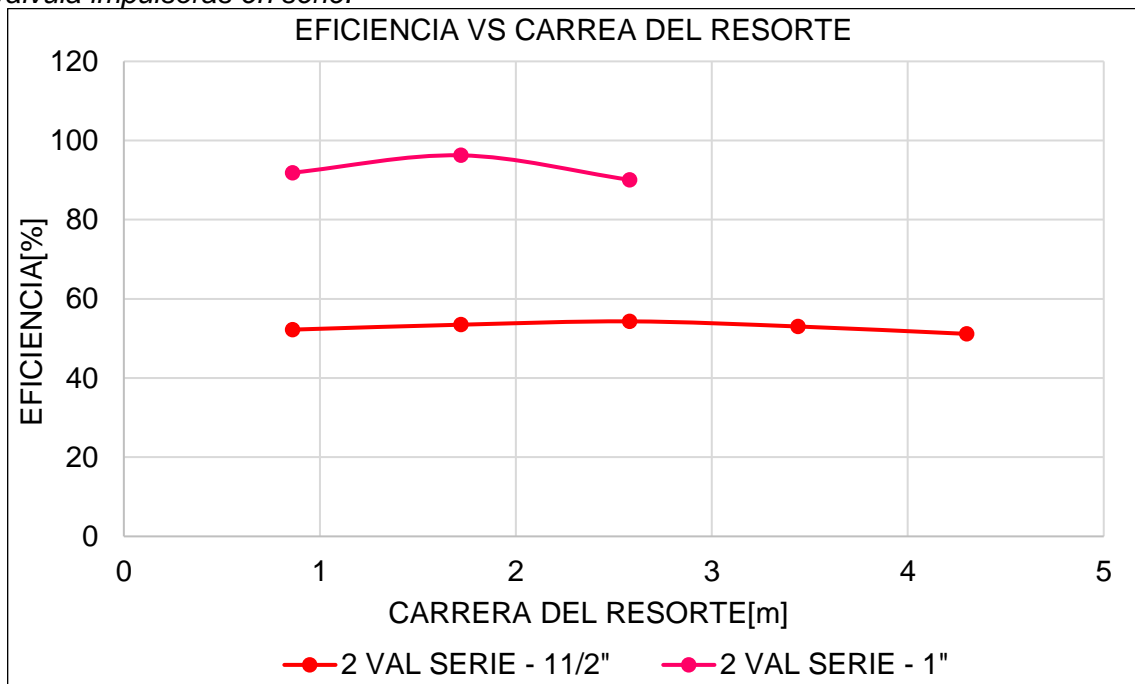


En este caso se está analizando, las eficiencias de la figura 53 y figura 63. En la figura 73 se puede observar que, la mayor eficiencia es de la bomba de ariete hidráulico de diámetro de 1 1/2" con 1 válvula impulsora. Esto sucede porque el caudal de descarga para el prototipo de diámetro de 1 1/2" es mayor que para el prototipo de diámetro de 1", y al mismo tiempo el caudal perdido para el prototipo de diámetro de 1 1/2" es menor que para el prototipo de diámetro de 1"; siendo la variación del caudal perdido en mayor cantidad que la variación del caudal de descarga. De esta manera se genera que la eficiencia máxima del prototipo de 1 1/2" es mayor en 57.68% que la eficiencia máxima del prototipo de 1".

1.23.2. Comparación de los resultados de la eficiencia para la bomba de ariete de diámetros de 11/2" y 1" con 2 válvulas impulsoras en serie

Figura 74

Comparación de la eficiencia para la bomba de ariete de diámetros de 11/2" y 1" con 2 válvulas impulsoras en serie.

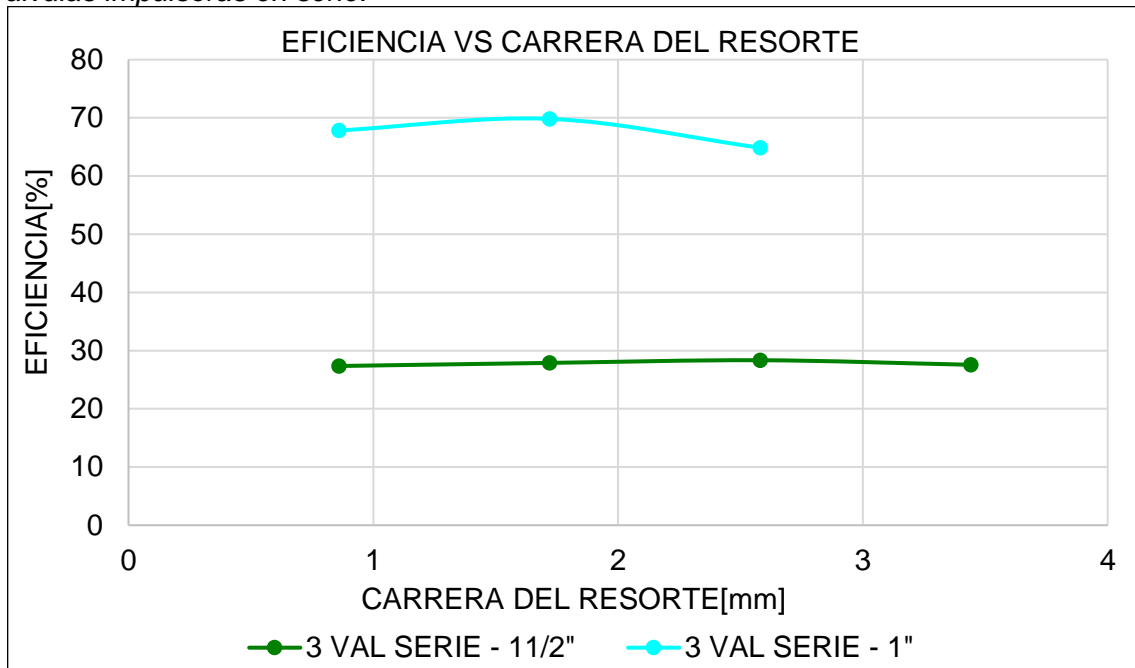


En este caso se está comparando, las eficiencias generadas en la figura 54 y figura 64. Como se puede apreciar en la figura 74, la eficiencia de la bomba de ariete hidráulico de diámetro de 1" con 2 válvulas impulsoras en serie es superior a la eficiencia de la bomba de ariete de diámetro de 11/2" con 2 válvulas impulsoras en serie. Esto sucede porque el caudal perdido para el prototipo de diámetro de 1" es menor que el prototipo de diámetro de 11/2", y a pesar de que el caudal de descarga para el prototipo de diámetro de 1" es menor que el prototipo de diámetro de 11/2"; la variación del caudal perdido es en mayor cantidad que la variación del caudal de descarga. Generándose así, que la eficiencia máxima del prototipo de 1" es mayor en 77.21% que la eficiencia máxima del prototipo de 11/2".

1.23.3. Comparación de los resultados de la eficiencia para la bomba de ariete de diámetros de 11/2" y 1" con 3 válvulas impulsoras en serie

Figura 75

Comparación de la eficiencia para la bomba de ariete de diámetros de 11/2" y 1" con 3 válvulas impulsoras en serie.

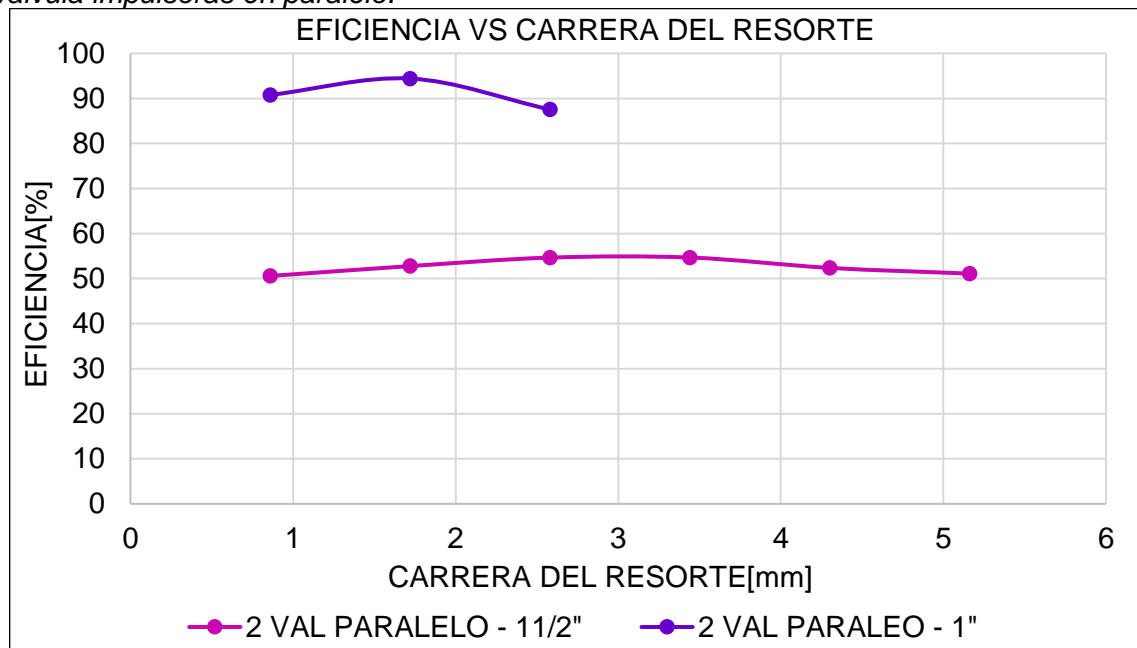


En este caso se está analizando, las eficiencias originadas en la figura 55 y figura 65. En la figura 75 se puede observar que la eficiencia de la bomba de ariete de diámetro de 1" con 3 válvulas impulsoras en serie es superior a la eficiencia de la bomba de ariete de diámetro de 11/2" con 3 válvulas impulsoras en serie. Esto sucede porque el caudal perdido para el prototipo de 1" es menor que el prototipo de 11/2", y a pesar de que el caudal de descarga del prototipo de 1" es menor que el prototipo de 11/2"; el caudal perdido varía en mayor cantidad que el caudal de descarga. Generándose así, que la eficiencia máxima del prototipo de 1" es mayor en 146.31% que la eficiencia máxima del prototipo de 11/2".

1.23.4. Comparación de los resultados de la eficiencia para la bomba de ariete de diámetros de 1 1/2" y 1" con 2 válvula impulsora en paralelo

Figura 76

Comparación de la eficiencia para la bomba de ariete de diámetros de 1 1/2" y 1" con 2 válvula impulsoras en paralelo.

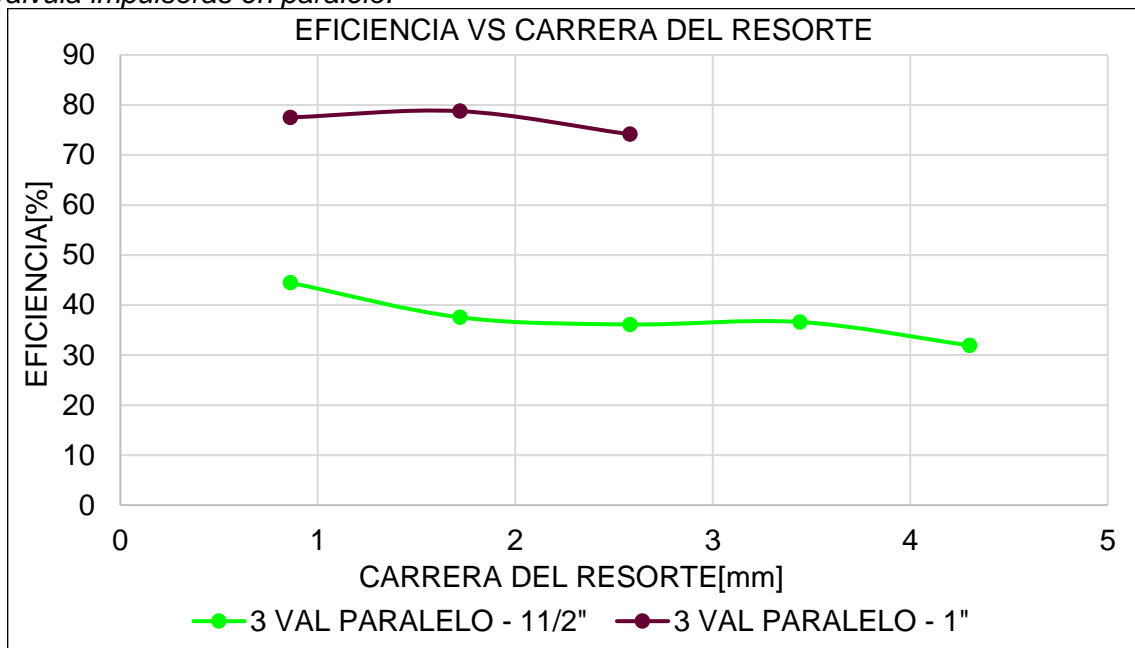


En este caso se está analizando, la eficiencia originada en la figura 56 y figura 66. En la figura 77 se puede observar que, la eficiencia de la bomba de ariete de diámetro de 1" con 2 válvulas impulsoras en paralelo es superior a la eficiencia de la bomba de ariete de diámetro de 1 1/2" con 2 válvulas impulsoras en paralelo. Esto ocurre porque el caudal perdido para el prototipo de diámetro de 1" es menor que para el prototipo de diámetro de 1 1/2", y a pesar de que el caudal de descarga del prototipo de diámetro de 1" es menor que el prototipo de diámetro de 1 1/2"; la variación del caudal perdido es en mayor cantidad que la variación del caudal de descarga. Ocurriendo así, que la eficiencia máxima del prototipo de 1" es mayor en 71.65% que la eficiencia máxima del prototipo de 1 1/2".

1.23.5. Comparación de los resultados de la eficiencia para la bomba de ariete de diámetros de 11/2" y 1" con 3 válvulas impulsoras en paralelo

Figura 77

Comparación de la eficiencia de la bomba de ariete de diámetros de 11/2" y 1" con 3 válvulas impulsoras en paralelo.



En este caso se analiza y compara, las eficiencias originadas en la figura 57 y figura 67. En la figura 77 se puede observar que, la eficiencia de la bomba de ariete de diámetro de 1" con 3 válvulas impulsoras en paralelo es superior a la bomba de ariete de diámetro de 11/2" con 3 válvulas impulsoras en paralelo. Esto se da porque el caudal perdido del prototipo de diámetro de 1" es menor que el prototipo de diámetro de 11/2", y a pesar de que el caudal de descarga del prototipo de diámetro de 1" es menor que el prototipo de diámetro de 11/2", la variación del caudal perdido es en mayor cantidad que el caudal de descarga. Generándose así, que la eficiencia máxima del prototipo de diámetro de 1" es mayor en 77.15% que la eficiencia máxima del prototipo de diámetro de 11/2".

1.24. Comparación de la eficiencia esperada respecto a la eficiencia obtenida en el laboratorio.

En este apartado se compara el rango de eficiencia esperada respecto a las eficiencias obtenidas en el laboratorio, esto se realiza con la finalidad de encontrar algún parámetro que ha influido, en la eficiencia obtenida, de algunos prototipos en el laboratorio para que dichas eficiencias hayan resultado ser superiores al rango de eficiencia esperada máxima de 67.20%.

Tabla 21

Resultados de eficiencia esperada y eficiencias obtenidas en el laboratorio.

Configuración de la bomba de ariete	Rango de eficiencia esperada	Eficiencia obtenida
Bomba de Ariete de 11/2" con 1 Válvula Impulsora para Sr = 3.44 mm	[17.69% - 67.20%]	92.53%
Bomba de Ariete de 11/2" con 1 Válvula Impulsora para Sr = 4.30 mm	[17.69% - 67.20%]	91.92%
Bomba de Ariete de 11/2" con 1 Válvula Impulsora para Sr = 5.16 mm	[17.69% - 67.20%]	89.95%
Bomba de Ariete de 11/2" con 1 Válvula Impulsora para Sr = 6.02 mm	[17.69% - 67.20%]	94.38%
Bomba de Ariete de 11/2" con 1 Válvula Impulsora para Sr = 6.88 mm	[17.69% - 67.20%]	95.51%
Bomba de Ariete de 11/2" con 1 Válvula Impulsora para Sr = 7.74 mm	[17.69% - 67.20%]	93.39%
Bomba de Ariete de 11/2" con 1 Válvula Impulsora para Sr = 8.60 mm	[17.69% - 67.20%]	81.73%
Bomba de Ariete de 11/2" con 1 Válvula Impulsora para Sr = 9.46 mm	[17.69% - 67.20%]	64.69%
Bomba de Ariete de 11/2" con 1 Válvula Impulsora para Sr = 10.32 mm	[17.69% - 67.20%]	48.81%
Bomba de Ariete de 11/2" con 2 Válvulas Impulsoras en serie para Sr = 0.86 mm	[17.69% - 67.20%]	52.23%
Bomba de Ariete de 11/2" con 2 Válvulas Impulsoras en serie para Sr = 1.72 mm	[17.69% - 67.20%]	53.48%
Bomba de Ariete de 11/2" con 2 Válvulas Impulsoras en serie para Sr = 2.58 mm	[17.69% - 67.20%]	54.32%
Bomba de Ariete de 11/2" con 2 Válvulas Impulsoras en serie para Sr = 3.44 mm	[17.69% - 67.20%]	53.03%
Bomba de Ariete de 11/2" con 2 Válvulas Impulsoras en serie para Sr = 4.30 mm	[17.69% - 67.20%]	51.16%
Bomba de Ariete de 11/2" con 3 Válvulas Impulsoras en Serie para Sr = 0.86 mm	[17.69% - 67.20%]	27.36%
Bomba de Ariete de 11/2" con 3 Válvulas Impulsoras en Serie para Sr = 1.72 mm	[17.69% - 67.20%]	27.89%
Bomba de Ariete de 11/2" con 3 Válvulas Impulsoras en Serie para Sr = 2.58 mm	[17.69% - 67.20%]	28.35%
Bomba de Ariete de 11/2" con 3 Válvulas Impulsoras en Serie para Sr = 3.44 mm	[17.69% - 67.20%]	27.57%
Bomba de Ariete de 11/2" con 2 Válvulas Impulsoras en Paralelo para Sr = 0.86 mm	[17.69% - 67.20%]	50.58%

Configuración de la bomba de ariete	Rango de eficiencia esperada	Eficiencia obtenida
Bomba de Ariete de 11/2" con 2 Válvulas Impulsoras en Paralelo para Sr = 1.72 mm	[17.69% - 67.20%	52.78%
Bomba de Ariete de 11/2" con 2 Válvulas Impulsoras en Paralelo para Sr = 2.58 mm	[17.69% - 67.20%]	54.66%
Bomba de Ariete de 11/2" con 2 Válvulas Impulsoras en Paralelo para Sr = 3.44 mm	[17.69% - 67.20%]	54.68%
Bomba de Ariete de 11/2" con 2 Válvulas Impulsoras en Paralelo para Sr = 4.30 mm	[17.69% - 67.20%]	52.38%
Bomba de Ariete de 11/2" con 2 Válvulas Impulsoras en Paralelo para Sr = 5.16 mm	[17.69% - 67.20%	51.11%
Bomba de Ariete de 11/2" con 3 Válvulas Impulsoras en Paralelo para Sr = 0.86 mm	[17.69% - 67.20%]	44.46%
Bomba de Ariete de 11/2" con 3 Válvulas Impulsoras en Paralelo para Sr = 1.72 mm	[17.69% - 67.20%]	37.55%
Bomba de Ariete de 11/2" con 3 Válvulas Impulsoras en Paralelo para Sr = 2.58 mm	[17.69% - 67.20%]	36.12%
Bomba de Ariete de 11/2" con 3 Válvulas Impulsoras en Paralelo para Sr = 3.44 mm	[17.69%- 67.20%]	36.61%
Bomba de Ariete de 11/2" con 3 Válvulas Impulsoras en Paralelo para Sr = 4.30 mm	[17.69% - 67.20%]	31.94%
Bomba de Ariete de 1" con 1 Válvula Impulsora para Sr = 4.30 mm	[17.69% - 67.20%]	60.57%
Bomba de Ariete de 1" con 1 Válvula Impulsora para Sr = 5.16 mm	[17.69% - 67.20%]	55.66%
Bomba de Ariete de 1" con 1 Válvula Impulsora para Sr = 6.02 mm	[17.69% - 67.20%]	52.60%
Bomba de Ariete de 1" con 1 Válvula Impulsora para Sr = 6.88 mm	[17.69% - 67.20%]	41.76%
Bomba de Ariete de 1" con 2 Válvulas Impulsoras en Serie para Sr = 0.86 mm	[17.69% - 67.20%]	91.88%
Bomba de Ariete de 1" con 2 Válvulas Impulsoras en Serie para Sr = 1.72 mm	[17.69% - 67.20%]	96.26%
Bomba de Ariete de 1" con 2 Válvulas Impulsoras en Serie para Sr = 2.58 mm	[17.69% - 67.20%]	90.09%
Bomba de Ariete de 1" con 3 Válvulas Impulsoras en Serie para Sr = 0.86 mm	[17.69% - 67.20%]	67.83%
Bomba de Ariete de 1" con 3 Válvulas Impulsoras en Serie para Sr = 1.72 mm	[17.69% - 67.20%]	69.83%
Bomba de Ariete de 1" con 3 Válvulas Impulsoras en Serie para Sr = 2.58 mm	[17.69% - 67.20%]	64.87%
Bomba de Ariete de 1" con 2 Válvulas Impulsoras en paralelo para Sr = 0.86 mm	[17.69% - 67.20%]	90.77%
Bomba de Ariete de 1" con 2 Válvulas Impulsoras en paralelo para Sr = 1.72 mm	[17.69% - 67.20%]	94.41%
Bomba de Ariete de 1" con 2 Válvulas Impulsoras en paralelo para Sr = 2.58 mm	[17.69% - 67.20%]	87.54%
Bomba de Ariete de 1" con 3 Válvulas Impulsoras en paralelo para Sr = 0.86 mm	[17.69% - 67.20%]	77.51%
Bomba de Ariete de 1" con 3 Válvulas Impulsoras en paralelo para Sr = 1.72 mm	[17.69% - 67.20%]	78.76%
Bomba de Ariete de 1" con 3 Válvulas Impulsoras en paralelo para Sr = 2.58 mm	[17.69% - 67.20%]	74.15%

Sr: carrera del resorte.

Como se puede observar en la tabla 21, hay algunas eficiencias obtenidas en laboratorio que superan la eficiencia máxima esperada. Por ejemplo, el prototipo o

configuración, con la cual se determinó la mejor eficiencia, su eficiencia es de 96.26%, la cual supera considerablemente a la eficiencia máxima esperada de 67.20%. A continuación, se muestra uno de los parámetros que ha influido en las eficiencias del laboratorio por lo cual son superiores a la eficiencia esperada máxima.

Uno de los parámetros, que no se ha podido considerar en el diseño del prototipo, por las condiciones del LNH, ha sido la relación máxima que debe existir entre la altura de alimentación(H) y la altura de descarga(h).

Silver (1977), indica que la relación máxima que debe considerarse entre la altura de alimentación(H) y altura de descarga(h) debe ser de 1/2.

Por otro lado, Tiago (2002), también considera que la relación máxima de la altura de alimentación(H) entre la altura de descarga(h) debe ser 1/2, tal como muestra la tabla 22.

Tabla 22 Variación de la eficiencia respecto a la relación H/h (Tiago, 2002).

Relación(H/h)	Eficiencia
1/2	60%
1/3	55%
1/4	50%
1/5	45%
1/6	40%
1/7	35%
1/8	30%

En la tabla 22 se puede observar que al aumentar la relación H/h, la eficiencia aumenta. La relación H/h con la que se trabajó en el laboratorio ha sido de 0.62, la cual está por encima de la relación H/h máxima que debe considerarse; esto muestra que la relación H/h, ha sido uno de los parámetros que ha influido en los resultados de las eficiencias obtenidas en el laboratorio, por lo cual algunas eficiencias obtenidas en el laboratorio son superiores a la eficiencia esperada máxima de 67.20%.

1.25. Comparación de la eficiencia considerando el porcentaje de agua entregada

Esta comparación se realiza considerando, a parte de la eficiencia, también el porcentaje de agua entregada, esto con la finalidad de comparar las eficiencias obtenidas en el laboratorio respecto al rango de eficiencia obtenido por otros autores; asimismo la comparación se realiza para identificar las variables que han influido en las eficiencias obtenidos en el laboratorio, por lo cual dichas eficiencias, no se encuentran dentro del rango de eficiencia conseguido por otros autores.

Según Pawlick et al. (2018), la tabla 23 proporciona el porcentaje de agua entregada, considerando la eficiencia en la primera fila, y la relación de altura de descarga(h) entre la altura de alimentación(H) en la primera columna.

Según Zarate (2002), la bomba de ariete hidráulico tiene una eficiencia que varía entre 50% a 75%.

Según et al. Guo (2018), la eficiencia de la bomba de ariete, para una altura de descarga menor a 50 m, varía entre 50% a 70%.

Tabla 23

Porcentaje de agua entregada (Pawlick et al., 2018).

		Eficiencia (%)								
		25	30	35	40	45	50	55	60	65
Relación (h/H)	2	12.5	15	17.5	20	22.5	25	27.5	30	32.5
	3	8.3	10	11.7	13.3	15	16.7	18.4	20.1	21.8
	4	6.3	7.5	8.8	10	11.3	12.5	13.7	14.9	16.1
	5	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	6	4.2	5	5.8	6.7	7.5	8.3	9.1	9.9	10.7
	7	3.6	4.3	5	5.7	6.4	7.1	7.8	8.5	9.2
	8	3.1	3.8	4.4	5	5.6	6.3	6.9	7.5	8.1
	10	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5
	12	2.1	2.5	2.9	3.3	3.8	4.2	4.6	5	5.4
	15	1.7	2	2.3	2.7	3	3.3	3.6	3.9	4.2

	18	1.4	1.7	1.9	2.2	2.5	2.8	3.1	3.4	3.7
	21	1.2	1.4	1.7	1.9	2.1	2.4	2.7	3	3.3
	24	1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3	2.5	2.7

Para realizar la comparación, primero se aproxima la relación h/H en el laboratorio de 0.62 a 2; asimismo se considera, según los autores citados anteriormente, que la eficiencia en la tabla 23, se encuentre en el rango de [50% – 65%], por lo tanto, los valores de porcentaje de agua entregada se deben encontrar entre [25% – 32.5%].

1.25.1. Eficiencias que se ajustan al rango considerado en la tabla de Pawlick

Las eficiencias de la tabla 24, son las eficiencias obtenidas en el laboratorio que se aproximan al rango considerado en la tabla de 23 de Pawlick et al. (2018).

Tabla 24

Eficiencias obtenidas en el laboratorio que están dentro del rango de eficiencia [50% – 65%].

Configuración de la bomba de ariete	Porcentaje de agua entregada (%)	Eficiencia (%)
Bomba de Ariete de 11/2" con 1 Válvula Impulsora para Sr = 9.46 mm	40.11	64.69
Bomba de Ariete de 11/2" con 1 Válvula Impulsora para Sr = 10.32 mm	30.26	48.81
Bomba de Ariete de 11/2" con 2 Válvulas Impulsoras en serie para Sr = 0.86 mm	32.38	52.23
Bomba de Ariete de 11/2" con 2 Válvulas Impulsoras en serie para Sr = 1.72 mm	33.16	53.48
Bomba de Ariete de 11/2" con 2 Válvulas Impulsoras en serie para Sr = 2.58 mm	33.68	54.32
Bomba de Ariete de 11/2" con 2 Válvulas Impulsoras en serie para Sr = 3.44 mm	32.88	53.03
Bomba de Ariete de 11/2" con 2 Válvulas Impulsoras en serie para Sr = 4.30 mm	31.72	51.16
Bomba de Ariete de 11/2" con 2 Válvulas Impulsoras en Paralelo para Sr = 0.86 mm	31.36	50.58
Bomba de Ariete de 11/2" con 2 Válvulas Impulsoras en Paralelo para Sr = 1.72 mm	32.72	52.78
Bomba de Ariete de 11/2" con 2 Válvulas Impulsoras en Paralelo para Sr = 2.58 mm	33.89	54.66
Bomba de Ariete de 11/2" con 2 Válvulas Impulsoras en Paralelo para Sr = 3.44 mm	33.9	54.68
Bomba de Ariete de 11/2" con 2 Válvulas Impulsoras en Paralelo para Sr = 4.30 mm	32.48	52.38
Bomba de Ariete de 11/2" con 2 Válvulas Impulsoras en Paralelo para Sr = 5.16 mm	31.69	51.11
Bomba de Ariete de 11/2" con 3 Válvulas Impulsoras en Paralelo para Sr = 0.86 mm	27.57	44.46

Bomba de Ariete de 1" con 1 Válvula Impulsora para Sr = 4.30 mm	37.55	60.57
Bomba de Ariete de 1" con 1 Válvula Impulsora para Sr = 5.16 mm	34.51	55.66
Bomba de Ariete de 1" con 1 Válvula Impulsora para Sr = 6.02 mm	32.61	52.6
Bomba de Ariete de 1" con 1 Válvula Impulsora para Sr = 6.88 mm	25.89	41.76
Bomba de Ariete de 1" con 3 Válvulas Impulsoras en Serie para Sr = 0.86 mm	42.05	67.83
Bomba de Ariete de 1" con 3 Válvulas Impulsoras en Serie para Sr = 1.72 mm	43.29	69.83
Bomba de Ariete de 1" con 3 Válvulas Impulsoras en Serie para Sr = 2.58 mm	40.22	64.87

Sr: carrera del resorte.

1.25.2. Eficiencias que no se ajustan al rango considerado en la tabla de Pawlick

Los valores de la eficiencia obtenidos en el laboratorio de la tabla 25 y tabla 26, son los que se alejan del rango de eficiencia considerado en la tabla 23 de Pawlick et al. (2018), esto ha sucedido porque en la configuración de la bomba de ariete, existen algunas variables que influyen en la eficiencia, y esto hace que estén fuera del rango conseguido por otros autores.

Tabla 25

Eficiencias obtenidas en el laboratorio que son superiores al rango de eficiencia [50% – 65%]

Configuración de la bomba de ariete	Porcentaje de agua entregada %	Eficiencia %
Bomba de Ariete de 1 1/2" con 1 Válvula Impulsora para Sr = 3.44 mm	57.37	92.53
Bomba de Ariete de 1 1/2" con 1 Válvula Impulsora para Sr = 4.30 mm	56.99	91.92
Bomba de Ariete de 1 1/2" con 1 Válvula Impulsora para Sr = 5.16 mm	55.77	89.95
Bomba de Ariete de 1 1/2" con 1 Válvula Impulsora para Sr = 6.02 mm	58.51	94.38
Bomba de Ariete de 1 1/2" con 1 Válvula Impulsora para Sr = 6.88 mm	59.21	95.51
Bomba de Ariete de 1 1/2" con 1 Válvula Impulsora para Sr = 7.74 mm	57.90	93.39
Bomba de Ariete de 1 1/2" con 1 Válvula Impulsora para Sr = 8.60 mm	50.67	81.73
Bomba de Ariete de 1" con 2 Válvulas Impulsoras en Serie para Sr = 0.86 mm	56.96	91.88
Bomba de Ariete de 1" con 2 Válvulas Impulsoras en Serie para Sr = 1.72 mm	59.68	96.26
Bomba de Ariete de 1" con 2 Válvulas Impulsoras en Serie para Sr = 2.58 mm	55.86	90.09

Bomba de Ariete de 1" con 2 Válvulas Impulsoras en paralelo para Sr = 0.86 mm	56.28	90.77
Bomba de Ariete de 1" con 2 Válvulas Impulsoras en paralelo para Sr = 1.72 mm	58.54	94.41
Bomba de Ariete de 1" con 2 Válvulas Impulsoras en paralelo para Sr = 2.58 mm	54.27	87.54
Bomba de Ariete de 1" con 3 Válvulas Impulsoras en paralelo para Sr = 0.86 mm	48.06	77.51
Bomba de Ariete de 1" con 3 Válvulas Impulsoras en paralelo para Sr = 1.72 mm	48.83	78.76
Bomba de Ariete de 1" con 3 Válvulas Impulsoras en paralelo para Sr = 2.58 mm	45.97	74.15

Nota: Según la tabla de resultados obtenidos en el laboratorio, en las configuraciones donde el caudal de descarga ha sido mayor que el caudal perdido, la eficiencia supera considerablemente al rango de eficiencia conseguido por otros autores desde 50% hasta 65%. Estos prototipos, son, por ejemplo, para la bomba de ariete de 1 1/2", donde lo que se está variando es la carrera del resorte; también para los prototipos de 1", donde lo que se ha variado es el diámetro de la bomba de ariete, es decir, se ha realizado una reducción de la bomba de ariete.

Tabla 26

Eficiencias obtenidas en el laboratorio que son inferiores al rango de eficiencia [50% – 65%]

Configuración de la bomba de ariete	Porcentaje de agua entregada en %	Eficiencia en %
Bomba de Ariete de 1 1/2" con 3 Válvulas Impulsoras en Serie para Sr = 0.86 mm	16.97	27.36
Bomba de Ariete de 1 1/2" con 3 Válvulas Impulsoras en Serie para Sr = 1.72 mm	17.29	27.89
Bomba de Ariete de 1 1/2" con 3 Válvulas Impulsoras en Serie para Sr = 2.58 mm	17.58	28.35
Bomba de Ariete de 1 1/2" con 3 Válvulas Impulsoras en Serie para Sr = 3.44 mm	17.09	27.57
Bomba de Ariete de 1 1/2" con 3 Válvulas Impulsoras en Paralelo para Sr = 1.72 mm	23.28	37.55
Bomba de Ariete de 1 1/2" con 3 Válvulas Impulsoras en Paralelo para Sr = 2.58 mm	22.4	36.12
Bomba de Ariete de 1 1/2" con 3 Válvulas Impulsoras en Paralelo para Sr = 3.44 mm	22.7	36.61
Bomba de Ariete de 1 1/2" con 3 Válvulas Impulsoras en Paralelo para Sr = 4.30 mm	19.8	31.94

Nota: según la tabla de resultados obtenidos en el laboratorio, en las configuraciones donde el caudal perdido ha sido mayor o igual que tres veces el caudal de descarga, las eficiencias obtenidas en el laboratorio son inferiores al rango obtenido por

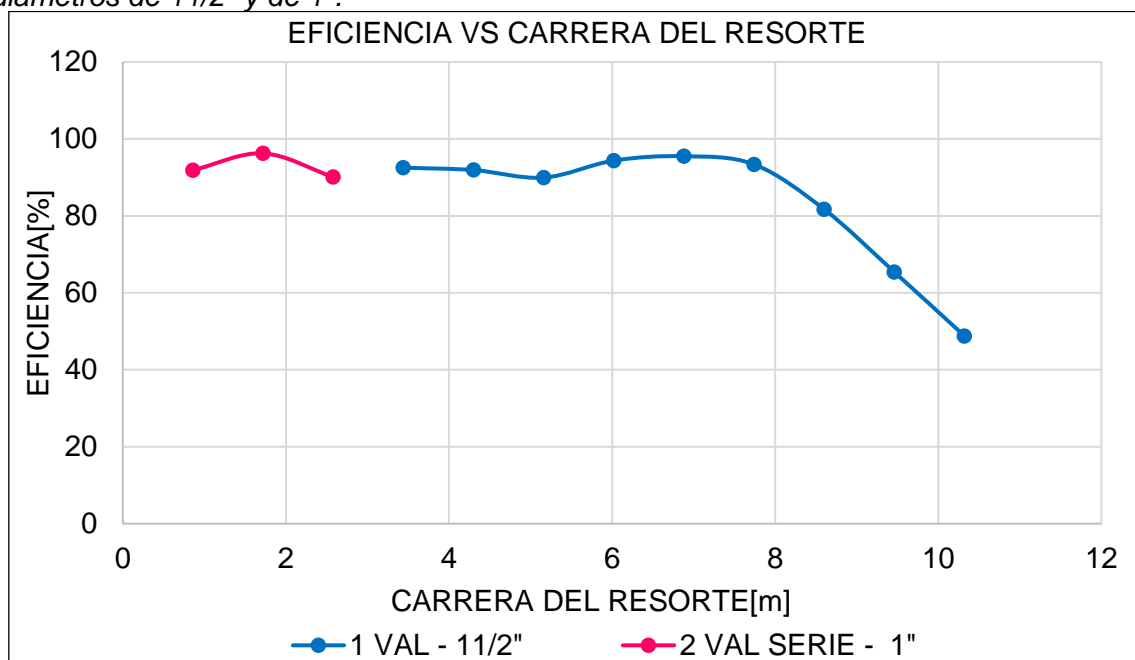
otros autores de 50% hasta 65%. Esto por ejemplo ha ocurrido para la bomba de ariete de 1 1/2", donde lo que se ha variado es el número de válvulas impulsoras, por ejemplo, estos prototipos están trabajando con 3 válvulas impulsoras.

1.26. Resumen de los resultados de la eficiencia de todos los prototipos de la bomba de ariete hidráulico de diámetros de 1 1/2" y 1"

El análisis que se está realizando es para determinar, el prototipo de la bomba de ariete con la mejor eficiencia. Para ello se está comparando las curvas con las máximas eficiencias, de los prototipos de la bomba de ariete hidráulico de diámetro de 1 1/2" y diámetro de 1"; las cuales son las curvas con eficiencias máximas, originadas en la figura 62 y figura 72.

Figura 78

Resumen de las máximas eficiencias de los prototipos de la bomba de ariete de diámetros de 1 1/2" y de 1".



En la figura 78 se puede apreciar que la eficiencia máxima de la bomba de ariete de diámetro de 1" con 2 válvulas impulsoras en serie, carrera del resorte de 1.72 mm es

mayor que la eficiencia máxima de la bomba de ariete de diámetro de 1 1/2" con 1 válvula impulsora, y carrera del resorte de 6.88 mm. Esto ocurre porque el caudal de alimentación de la bomba de ariete de diámetro de 1" con 2 válvulas impulsoras en serie es menor que de la bomba de ariete de diámetro de 1 1/2" con 1 válvula impulsora, y a pesar de que el caudal de descarga de la bomba de ariete de 1" es menor que de la bomba de ariete de 1 1/2"; el menor caudal de alimentación tiene mayor impacto en la eficiencia, ya que varía en mayor cantidad que el caudal de descarga. Ocurriendo así, que la eficiencia máxima del prototipo de diámetro de 1" es mayor en 0.78% que la eficiencia máxima del prototipo de 1 1/2". De esta manera se determina que la mejor eficiencia es para el prototipo de la bomba de ariete hidráulico de 1" con 2 válvulas impulsoras en serie, y carrera del resorte de 1.72 mm; la cual brinda la mejor eficiencia de 96.26%, con un caudal de descarga de 20.41 L/min, y a una altura de descarga de 5 m.

Por otro lado, Jiménez (2019), también encontró la máxima eficiencia de 74.79% para una bomba de ariete de 1" con 2 válvulas impulsoras en serie, y con un caudal de descarga de 2.66 L/min. En este caso este autor no reguló las válvulas impulsoras ni con pesas ni resortes.

También Mota (2014), encontró un caudal de descarga máxima de 5.17 L/min, en este caso este autor no analizó la eficiencia, sino el caudal de descarga, y trabajó con una bomba de ariete de 1" con 1 válvula impulsora.

1.27. Análisis del número de bombas de ariete para abastecer a una zona rural

Según Jiménez(2019), para abastecer a una zona rural de la sierra, con 2000 habitantes, se requiere de un caudal de bombeo de 72 L/min. El autor determinó que se necesita 27 bombas de ariete para cubrir esa demanda, las cuales son las bombas de ariete con la máxima eficiencia que encontró.

A continuación, se calcula el número de bombas de ariete requeridos para abastecer dicha zona. El prototipo con la mejor eficiencia, que se ha determinado en esta investigación, impulsa un caudal de 20.41 L/min. Por lo tanto, el número de bombas de ariete requeridos será:

$$\text{N}^\circ \text{ de bombas de ariete} = \frac{72}{20.41} = 3.53 \approx 4$$

Conclusiones

- En esta tesis, se evaluó y se determinó la mejor eficiencia de un prototipo de la bomba de ariete hidráulico multipulsor en serie y paralelo utilizando resortes en las válvulas impulsoras, donde se encontró que, la mejor eficiencia ocurre para una bomba de ariete de 1" con 2 válvulas impulsoras en serie, y carrera del resorte de 1.72 mm; la cual brinda la mejor eficiencia de 96.26 %.
- En esta investigación, se evaluó y se determinó la relación que existe entre la carrera del resorte y la eficiencia, donde se halló, que la carrera del resorte tiene una relación directa con la eficiencia hasta cierto punto, punto donde la bomba de ariete obtiene la mejor eficiencia, después de ese punto la eficiencia empieza a disminuir.
- En esta tesis, se determinó la relación que existe entre el número de válvulas impulsoras y la eficiencia, donde se determinó que, el número de válvulas impulsoras tiene una relación inversa con la eficiencia, es decir, al aumentar el número de válvulas impulsoras en serie y en paralelo, la eficiencia disminuye.
- En esta investigación, se comparó la eficiencia de las configuraciones de las válvulas impulsoras en serie y en paralelo, en la cual se encontró que, para 2 válvulas impulsoras en serie y para 2 válvulas impulsoras en paralelo, la diferencia porcentual de las eficiencias es muy leve, siendo las eficiencias casi iguales. Por otro lado, se encontró que, para 3 válvulas impulsoras en serie y para 3 válvulas impulsoras en paralelo, la diferencia porcentual de las eficiencias es considerable, siendo la configuración con 3 válvulas impulsoras en paralelo, la de mejor eficiencia.

- En esta tesis, se evaluó y se determinó la relación que existe entre el diámetro de la bomba de ariete y la eficiencia, donde se halló, que el diámetro de la bomba de ariete y la eficiencia tienen una relación inversa, es decir, cuando el diámetro de la bomba de ariete disminuye, manteniendo constante el diámetro de la tubería de alimentación, la eficiencia aumenta.
- En esta tesis, se comparó la eficiencia obtenida en laboratorio respecto a la eficiencia esperada; donde se encontró que algunas de las eficiencias obtenidas en el laboratorio superan a la eficiencia esperada máxima de 67.20%, asimismo se encontró que uno de los parámetros que ha influido, para que ocurra esto, ha sido la relación de la altura de alimentación(H) entre la altura de descarga(h), la cual debe ser 1/2 como máximo, según otros autores.
- En esta investigación, se ha encontrado que, si el caudal de descarga es mayor que el caudal perdido, la eficiencia obtenida en laboratorio supera al rango de eficiencia indicada por otros autores [50% – 65%]; asimismo la eficiencia de los prototipos, que superan dicho rango de eficiencia han sido por la influencia de la carrera del resorte, y por la reducción del diámetro de la bomba de ariete.
- En esta tesis, se ha encontrado que, si el caudal perdido es mayor o igual que el triple del caudal de descarga, entonces la eficiencia obtenida en el laboratorio es inferior al rango de eficiencia indicada por otros autores [50% – 65%]; asimismo la eficiencia de los prototipos, que son inferiores a dicho rango de eficiencia han sido por la influencia de la variación del número de válvulas impulsoras.

Recomendaciones

- En favor de seguir ampliando, el estudio sobre la eficiencia de la bomba de ariete hidráulico, se recomienda realizar una investigación con diferentes diámetros de alambre del resorte, y evaluar como impactan en el comportamiento de la eficiencia.
- Se recomienda investigar la relación que existe entre la variación de la altura de alimentación, y la variación del diámetro de alambre del resorte, para evaluar el impacto que tienen sobre la eficiencia.
- Se recomienda realizar una investigación sobre, la comparación de la eficiencia de bombas de ariete convencional en paralelo, y bombas de ariete multipulsor con válvulas impulsoras en paralelo.
- Se recomienda realizar una investigación, utilizando pesas y resortes en las válvulas impulsoras, para evaluar y comparar, el comportamiento de las eficiencias para ambos tipos de regulaciones.
- También se recomienda medir la presión, en la cámara de aire, en la salida de la bomba de ariete; esto para diferentes alturas de descarga, luego comparar el comportamiento de esas presiones respecto a la altura de descarga.
- Asimismo, se recomienda realizar, las soldaduras en las válvulas impulsoras con precisión y resistentes, para que no se desunen al momento que se produzcan los golpes de ariete. Además, se recomienda colocar empaquetaduras de un material resistente en la placa horizontal de las válvulas impulsoras, para que no se rompan con los golpes de ariete.

- Para futuras investigaciones, se recomienda considerar la relación máxima de altura de alimentación(H) entre la altura de descarga(h) de 0.5, indicada por otros autores, para que las eficiencias obtenidas en el laboratorio se ajusten más a las eficiencias determinadas por otros autores.

Referencias bibliográficas

- Abate, C. (2000). *Avaliação do Desempenho de um Carneiro Hidráulico com Tubulação de Alimentação em Aço Galvanizado e em PVC*. Universidad de Sao Paulo, Brasil.<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/111143/tde-20181127-161929/publico/AbateCaroline.pdf>
- Acitores, M. F. (2012). *Estudio Teórico y Experimental de la Bomba de Ariete*. Universidad.Carlos.III.de.Madrid,Madrid.<https://core.ac.uk/download/pdf/30046069>
- Ayala, C. M. (2006). *Diseño Y Construcción de un Ariete Multipulsor*. Universidad Nacional de Loja,Ecuador.<https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/16619/1/Ayala%20Chauvin%2C%20Manuel%20Ignacio.pdf>
- Bustamante, A., & Quezada, M. E. (2009). *Estudio de los Parámetros de Funcionamiento de la Bomba de Ariete Hidráulico Multimpulsor A&M 1.0*. Universidad Politecnica Salesiana,Ecuador.https://www.academia.edu/4832749/_ESTUDIO_DE_LOS_PAR%C3%81METROS_DE_FUNCIONAMIENTO
- Campaña, C. C., & Guamán, A. D. (2011). *Diseño y Construcción de una Bomba de Ariete Hidraulico*.Escuela_Politécnica_Nacional,Ecuador.<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4020>
- Galarza, R. F. (2013). *Estudio de factores hidráulicos en una bomba de ariete y su efecto sobre la eficiencia*. Universidad Técnica de Ambato, Ambato-Ecuador.
<https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/3714>

- Guo, X., Li, J., Yang, K., & Fu, H. (2018). Optimal design and performance analysis of hydraulic ram pump system. *Power and Energy*. <https://www.researchgate.net/publication/322878680>
- Jiménez, M. F. (2019). *Evaluación de la Eficiencia de la Bomba de Ariete Hidráulico Multi-impulsor Utilizando Botellas de Plástico en la Cámara de Aire*. Universidad Nacional de Ingeniería, Perú. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_3ef5f90ae4b7ac62ae597c6ee6576879
- Lofrío, G. A. (2020). *Estudio Paramétrico de la Bomba de Ariete*. Universidad Politécnica de Cartagena, España. <https://repositorio.upct.es/xmlui/bitstream/handle/10317/8519/tfg-lof-est.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Malca, J. R., & Quiroz, R. A. (2016). *Eficiencia de un Sistema de Suministro de Agua por Impulsión Utilizando Bombas de Ariete Hidráulico con Válvulas en Serie y en Paralelo*. Universidad Privada del Norte, Perú. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/10256>
- Mataix, C. (1986). *Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas* (2 ed.). //conve/ingenieria-claudio-mataix-mecanica-de-fluidos-y-maquinas-hidraulicas1.pdf
- Mota, M. Â. (2014). *Projecto de Carneiro Hidráulico com Integração de Energia Eléctrica Proveniente de Fonte Renovável*. Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Portugal. <https://repositorio.ipv.pt/handle/10400.19/2823>
- Ortiz, M. G. (2006). *EL Golpe de Ariete en Sistemas de Abastecimiento de Agua Potable*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2611_C.pdf

- Otí, I. P. (2017). *Ariete Hidráulico para Riego, Diseño, Construcción y Montaje*. Universidad de Cantabria, España. <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/11460/395118.pdf?sequence=1>
- Pawlick et al., C. G. (2018). *Ram Pump Design and Installation Manual for use in Developing Countries*. [//www.researchgate.net/publication/327059858](http://www.researchgate.net/publication/327059858)
- Penagos, V. D. (2018). *Análisis del Comportamiento del Ariete Hidráulico en Función del Volumen del Acumulador y la Constante Elástica del Resorte*. Instituto Tecnológica Metropolitana, Colombia. <https://repositorio.itm.edu.co/handle/20.500.12622/1500>
- Pizarro, D., & Campoverde, E. (2011). *Emplazamiento, Implementación, Pruebas de Funcionamiento y Propuestas de Mejora de los Sistemas de Bombeo Mediante Rueda Hidráulica y Ariete Multipulsor para el Abastecimiento de Agua para Irrigación en la Localidad del Campus Juan Lunardi-Yumacay-Paute*. Universidad Politécnica de Salesiana, Ecuador. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/1336>
- Quiroga, M. J., Sierra, G. C., & Biancha, G. G. (2013). Análisis del Ariete Hidráulico para Diferentes Configuraciones. *Revista UIS Ingenierías*, Vol.12(n.2), p.p 29-34. <https://www.redalyc.org/pdf/5537/553756870003.pdf>
- Silver, M. (1977). *Use of Hydraulic Rams*. Nepal. <https://www.ircwash.org/sites/default/files/232.5-77US.pdf>

Steel Mefobo. (1940). *Más Muelles Panamá*. Obtenido de Resortes de Compresion :
<https://www.panama.masmuelles.com/resortes-compresion>

Tiago, G. (2002). *CARNEIRO HIDRÁULICO O QUE É - E COMO CONSTRUÍ-LO*. Brasil .
https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5811359/mod_resource/content/0/Carneiro%20hidráulico.pdf

Watt. (1974). *A Manual of Information on the Automatic Hydraulic Ram for Pumping Water*.
Reino Unido. [//www.ircwash.org/sites/default/files/232.5-74MA.pdf](http://www.ircwash.org/sites/default/files/232.5-74MA.pdf)

Zárate, R. N. (2002). *Modelagem, Otimização e Avaliação de um Carneiro Hidráulico*.
Universidade de São Paulo, Brasil. <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11143/tde-12022003-161510/publico/ricardo.pdf>

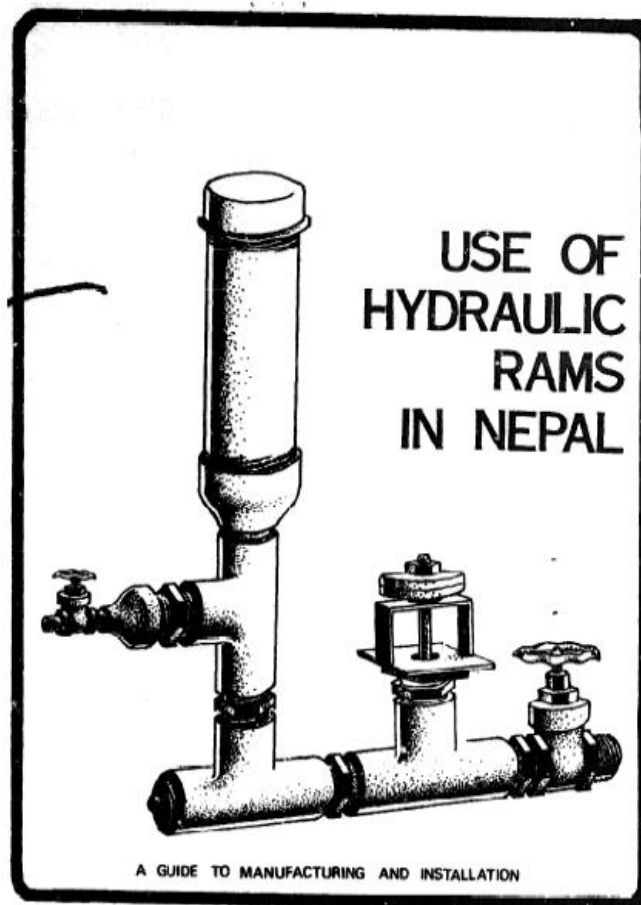
Anexos

Anexo N° 1

Noma DTU(Usos e instalación de bombas de ariete)

Figura 79

Manual de diseño y construcción de la bomba de ariete hidráulico (Galarza, 2013).



Anexo N° 2

Panel fotográfico

Figura 80

Colocación de la bomba sumergible en la cisterna de 3.5 m de altura.



Figura 81

Salida de la línea de impulsión de la cisterna.



Figura 82

Línea de impulsión que alimenta al tanque elevado.



Figura 83

Ubicación de la válvula compuerta de 1 1/2" en la línea de impulsión.



Figura 84

Ubicación de la válvula esférica de 1 1/2" en la tubería de alimentación.



Figura 85

Punto de ubicación de la reducción de 1 1/2" a 1" en la tubería de alimentación.



Figura 86

Colocación de pelotas de tenis en la cámara de aire.

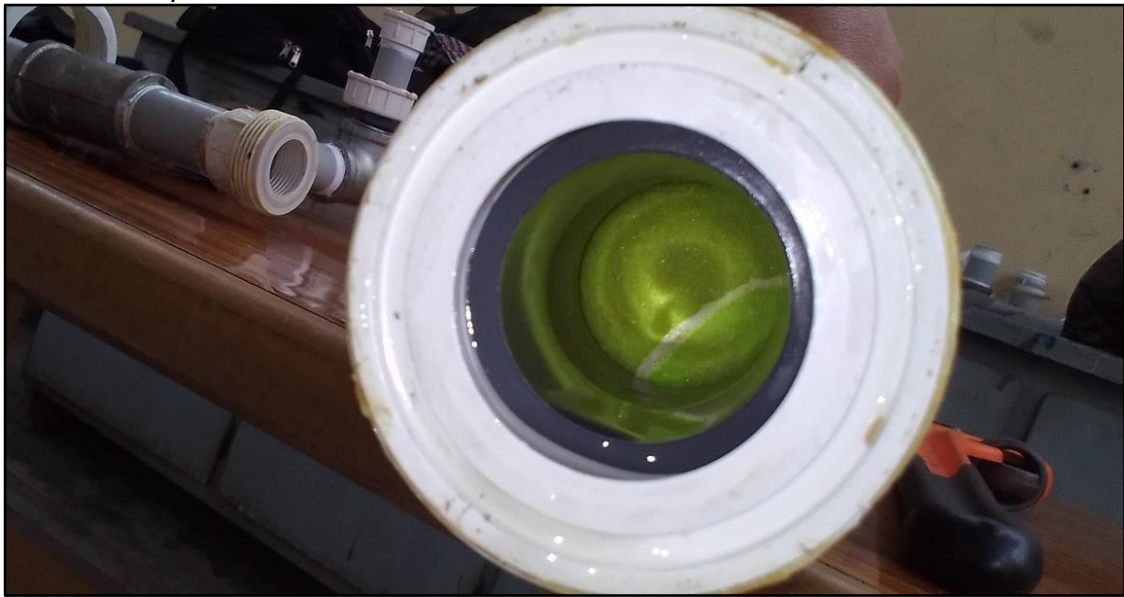


Figura 87

Bomba de ariete funcionando con 1 válvula impulsora.



Figura 88

Bomba de ariete funcionando con 2 válvula impulsoras en serie.



Figura 89

Bomba de ariete funcionando con 3 válvulas impulsoras en serie.



Figura 90

Bomba de ariete funcionando con 2 válvulas impulsoras en paralelo.



Figura 91

Bomba de ariete funcionando con 3 válvulas impulsoras en paralelo.



Figura 92

Colocación de la línea de descarga hasta una altura de 5 m.



Figura 93

Medición del caudal de descarga.



Figura 94

Medición del caudal perdido.



Figura 95

Ajuste de las tuercas con llaves combinadas N° 17



Figura 96

Prototipo con la cual se obtuvo la mejor eficiencia.



Figura 97

Adquisición de resortes de compresión (Av. Ramon Cárcamo 565, Lima).



Figura 98

Perforación de orificio con rosca interna en el tornero.



Figura 99

Soldadura con plata de las válvulas impulsoras.



Anexo N° 3

Resortes

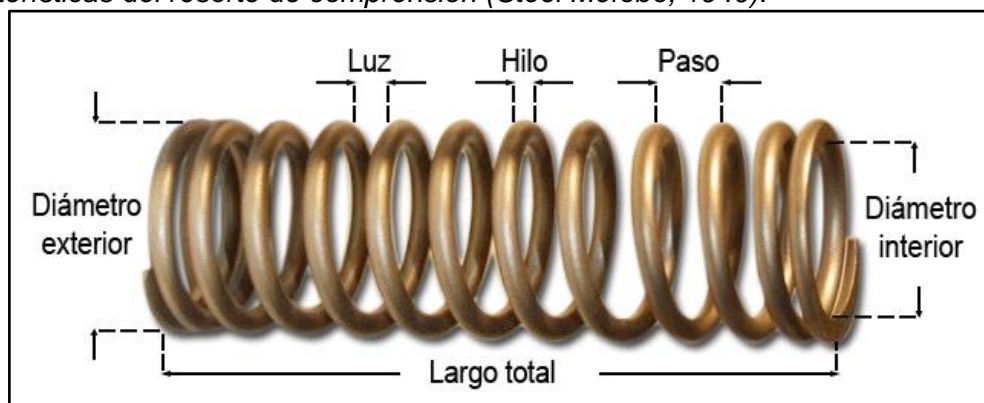
Figura 100

Diámetros comerciales de los resortes.

Tipo de resorte	Diámetro comercial del alambre (Hilo)	Material	Luz(mm)
Resorte de compresión-espinal recta	0.25 mm	Acero	4.5
Resorte de compresión-espinal recta	0.8 mm	Acero	4.5
Resorte de compresión-espinal recta	1 mm	Acero	4.5
Resorte de compresión-espinal recta	1.2 mm	Acero	4.5
Resorte de compresión-espinal recta	1.3 mm	Acero	4.5
Resorte de compresión-espinal recta	1.5 mm	Acero	4.5
Resorte de compresión-espinal recta	1.6 mm	Acero	4.5
Resorte de compresión-espinal recta	1.8 mm	Acero	4.5
Resorte de compresión-espinal recta	2 mm	Acero	4.5

Figura 101

Características del resorte de compresión (Steel Mefobo, 1940).



- Paso = Luz + hilo