

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA Y OBRAS SANITARIAS**



**EL ARIETE HIDRÁULICO COMO UNA ALTERNATIVA PARA
EL BOMBEO DE CAUDALES.**

Por:

LUISA ARIANA JURADO SILVA

Semestre I-2024

TARIJA-BOLIVIA

DEDICATORIA

A mis padres, Deterlino y Leda, por su amor y apoyo incondicional. Gracias por creer en mí y enseñarme el valor del esfuerzo y la dedicación.

A mi hermano Mario, por ser mi compañero de vida, mi inspiración y mi amigo. Gracias por tu apoyo y por compartir este viaje conmigo.

ÍNDICE

CAPÍTULO I: GENERALIDADES.

1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.2.1. Descripción del problema.....	2
1.2.2. Planteamiento del problema.	4
1.2.3. Formulación del problema.....	5
1.3. Objetivos.....	5
1.3.1. Objetivo General.....	5
1.3.2. Objetivos Específicos.	5
1.4. Hipótesis.	5
1.5. Justificación.	6
1.5.1. Justificación académica.....	6
1.5.2. Justificación técnica.....	6
1.5.3. Justificación social.....	6
1.6. Alcance.	7
1.7. Metodología y plan de trabajo.	8
1.7.1. Metodología.....	8

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.

2.1. Introducción.....	10
2.2. Sistema de bombeo.....	11
2.2.1. Definición de sistema de bombeo.....	11
2.2.2. Elementos típicos de un sistema de bombeo.	11
2.3. Bombas de agua.....	12

2.3.1.	Clasificación de las bombas de agua según la disponibilidad de energía.....	13
2.3.1.1.	Bombas de energía eléctrica.....	13
2.3.1.2.	Bombas de energía no eléctrica.....	15
2.4.	Bomba de ariete.	21
2.4.1.	¿Qué es una bomba de ariete?	21
2.4.2.	Golpe de ariete.....	21
2.4.3.	Efecto del golpe de ariete en la estructura del ariete hidráulico.....	27
2.4.4.	Historia.	29
2.5.	Configuración típica del ariete hidráulico.....	30
2.5.1.	Fuente de agua.....	32
2.5.2.	Colector de fuente.....	33
2.5.3.	Tanque de abastecimiento.....	34
2.5.4.	Tubería de alimentación o impulsión.	35
2.5.5.	Bomba de ariete.....	35
2.5.5.1.	Cuerpo del ariete.	35
2.5.5.2.	Válvula de control.....	36
2.5.5.3.	Válvula de impulso.....	36
2.5.5.4.	Válvula de aire.	36
2.5.5.5.	Válvula de retención.....	36
2.5.5.6.	Cámara de presión.....	37
2.5.6.	Conducto vertical o tubería de descarga.....	37
2.5.7.	Tanque de almacenamiento.....	37
2.6.	Principio de funcionamiento del ariete hidráulico.	37
2.7.	Periodos en que se divide el ciclo de trabajo del ariete.	39

2.8.	Algunos tipos constructivos de bombas de ariete.	46
2.9.	Arietes en serie y en paralelo.	48
2.10.	Fundamento teórico para el diseño de una bomba de ariete.	49
2.10.1.	Localización de la bomba.	49
2.10.2.	Altura de entrega o descarga (H_d).	50
2.10.3.	Altura de suministro o alimentación (H_a).	50
2.10.4.	Tubería de suministro.	51
2.10.5.	Tubería de descarga.	53
2.10.6.	Propiedades de los fluidos.	53
2.10.6.1.	Peso específico.	53
2.10.6.2.	Densidad.	53
2.10.6.3.	Viscosidad.	54
2.10.7.	Caudal de alimentación o suministro (Q).	55
2.10.7.1.	Numero de Reynolds.	55
2.10.7.2.	Rugosidad relativa.	56
2.10.7.3.	Factor de fricción.	56
2.10.7.4.	Pérdidas mayores o de fricción.	57
2.10.7.5.	Pérdidas menores o locales.	58
2.10.7.6.	Ecuaciones para el cálculo del caudal de suministro.	58
2.10.8.	Aplicación de la ecuación de Bernoulli.	60
2.10.9.	Velocidad en salida de las válvulas.	61
2.10.10.	Pérdida de presión total.	61
2.10.11.	Altura desarrollada por el ariete.	62
2.10.12.	Cálculo del golpe de ariete.	62

2.10.12.1.	Celeridad.....	62
2.10.12.2.	El pulso de Joukowsky (Zhukovski).....	63
2.10.12.3.	Tiempo de cierre de la válvula.....	63
2.10.12.4.	Cierre brusco.....	65
2.10.12.5.	Cierre lento.....	65
2.10.13.	Fuerza de arrastre sobre la válvula de impulso.....	66
2.10.14.	Pérdida hidráulica en la válvula de impulso.....	68
2.10.15.	Presión dinámica.....	68
2.10.16.	Peso máximo para la válvula de impulso.....	69
2.10.17.	Presión máxima y mínima de instalación.....	69
2.10.18.	Potencia útil del ariete.....	70
2.10.19.	Potencia recibida.....	71
2.10.20.	Eficiencia.....	71
2.10.21.	Rendimiento volumétrico.....	71

CAPÍTULO III: DESARROLLO DEL TRABAJO.

3.1.	Fabricación de un prototipo de bomba de ariete.....	72
3.1.1.	Materiales necesarios.....	72
3.1.2.	Construcción del prototipo de bomba de ariete.....	74
3.1.3.	Prueba del prototipo de ariete hidráulico.....	74
3.1.3.1.	Sitio de prueba.....	74
3.1.3.2.	Pruebas de funcionamiento.....	75
3.1.4.	Datos obtenidos de la prueba en campo.....	75
3.1.5.	Resultados.....	76
3.2.	Bomba de ariete comercial. Prueba en campo.....	77

3.2.1.	Selección de bomba de ariete.	77
3.2.2.	Mediciones en campo. Bomba de ariete de 4".	78
3.2.2.1.	Localización de la bomba.....	78
3.2.2.2.	Dimensiones de la bomba y parámetros iniciales.	79
3.2.2.3.	Curva característica.	80
3.3.	Bomba de ariete comercial. Cálculos teóricos.	82
3.3.1.	Consideraciones preliminares.....	82
3.3.1.1.	Altura de entrega o descarga:	82
3.3.1.2.	Cálculo de la altura de alimentación o suministro:	82
3.3.1.3.	Cálculo de la longitud de la tubería de suministro:.....	82
3.3.1.4.	Elección de la tubería de suministro	83
3.3.1.5.	Cálculo de la tubería de descarga:.....	84
3.3.2.	Cálculo del caudal de suministro.....	84
3.3.2.1.	Determinación del tipo de régimen.	84
3.3.2.2.	Cálculo de la rugosidad relativa.....	85
3.3.2.3.	Cálculo del factor de fricción.....	85
3.3.2.4.	Cálculo de pérdidas por fricción en la tubería de suministro	85
3.3.3.	Determinación de los coeficientes locales.....	86
3.3.4.	Cálculo del caudal necesario para abastecer el ariete hidráulico.....	87
3.3.5.	Cálculo de la velocidad en las válvulas de impulso	90
3.3.6.	Tiempo de duración de un periodo.	90
3.3.7.	Cálculo del caudal total en un ciclo.....	90
3.3.7.1.	Cálculo del caudal de desecho en un ciclo de trabajo.	90
3.3.7.2.	Cálculo de bombeo en un ciclo de trabajo.	91

3.3.8.	Cálculo de la presión dinámica.....	91
3.3.9.	Cálculo de la energía cinética.	92
3.3.10.	Cálculo de las pérdidas en la tubería de descarga o conducto vertical.	92
3.3.10.1.	Cálculo de las pérdidas por fricción en el conducto vertical.....	92
3.3.10.2.	Cálculo de las pérdidas locales en el conducto vertical.	93
3.3.11.	Cálculo de la altura de desarrollo del ariete.	93
3.3.12.	Cálculo de fenómenos físicos involucrados en el ariete hidráulico.....	93
3.3.12.1.	Cálculo de la celeridad de la onda de presión.	93
3.3.12.2.	Cálculo del tiempo de cierre de la válvula.	94
3.3.12.3.	Cálculo del pulso de Joukowsky (Zhukovski).	94
3.3.13.	Cálculo del coeficiente de arrastre de la válvula de impulso.....	95
3.3.14.	Cálculo de la fuerza hidráulica sobre la válvula de impulsión.	95
3.3.15.	Cálculo del peso para la válvula de impulso.....	96
3.3.16.	Cálculo de la potencia útil del ariete hidráulico.....	98
3.3.17.	Cálculo de la potencia recibida.	99
3.3.18.	Cálculo de la eficiencia.	99
3.3.19.	Cálculo del rendimiento volumétrico.....	99
3.3.20.	Eficiencia y rendimiento volumétrico con valores medidos en campo.	99
3.3.20.1.	Cálculo de la eficiencia.	99
3.3.20.2.	Cálculo del rendimiento volumétrico.....	100
3.4.	Alternativas de bombeo disponibles en el mercado.....	100
3.4.1.	Bombas de energía eléctrica.	100
3.4.2.	Bombas de energía fotovoltaica.....	103
3.4.3.	Bombas de ariete.	104

CAPÍTULO IV: RESULTADOS.

4.1. Resultados de la prueba en campo. Prototipo de 1 pulgada.....	106
4.2. Resultados de prueba en campo. Bomba de ariete de 4 pulgadas.....	107
4.3. Curvas características.....	107
4.4. Alternativas de bombeo	110
4.5. Ventajas y desventajas del ariete hidráulico.....	111
4.5.1. Ventajas.....	111
4.5.2. Desventajas.....	112

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. Conclusiones.....	113
5.2. Recomendaciones	115

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

WEBGRAFÍA.

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A: Alternativas de bombeo disponibles en el mercado.

Anexo B: Tipos de válvulas de impulso.

Anexo C: Tablas para el cálculo teórico.

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

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

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 2.1. Elementos de un sistema de bombeo.	12
Figura N° 2.2. Onda de presión en el cierre instantáneo de una válvula.	22
Figura N° 2.3. No hay perturbaciones.	23
Figura N° 2.4. Tiempo 0 en que la válvula queda totalmente cerrada.	24
Figura N° 2.5. Tiempo $L/2a$	24
Figura N° 2.6. Tiempo La	24
Figura N° 2.7. Tiempo $3/2La$	25
Figura N° 2.8. Tiempo $2La$	25
Figura N° 2.9. Tiempo $5/2La$	26
Figura N° 2.10. Tiempo $3La$	26
Figura N° 2.11. Tiempo $7/2La$	26
Figura N° 2.12. Tiempo $4La = T$ (Periodo).	27
Figura N° 2.13. Instrumento experimental del efecto del golpe de ariete.	28
Figura N° 2.14. Primeros esquemas de funcionamiento del ariete hidráulico.	30
Figura N° 2.15. Configuración típica del ariete hidráulico.	31
Figura N° 2.16. Esquema de instalación de un ariete hidráulico.	32
Figura N° 2.17. Formación de estratos.	33
Figura N° 2.18. Ubicación del colector de fuente y tanque de abastecimiento.	34
Figura N° 2.19. Cuerpo del ariete hidráulico.	35
Figura N° 2.20. Esquema del principio de funcionamiento del ariete hidráulico.	38
Figura N° 2.21. Eventos que se presentan en un ciclo.	40
Figura N° 2.22. Representación de los periodos. Grafica de velocidad vs tiempo.	40
Figura N° 2.23. Inicio del primer periodo de la operación del ariete hidráulico.	42

Figura N° 2.24. Cierre de las válvulas de impulso.	43
Figura N° 2.25. Segundo periodo de la operación del ariete hidráulico.....	44
Figura N° 2.26. Tercer periodo de la operación del ariete hidráulico.....	45
Figura N° 2.27. Tercer periodo de la operación del ariete hidráulico.....	45
Figura N° 2.28. Reapertura de las válvulas nuevo ciclo de trabajo.....	46
Figura N° 2.29. Ariete hidráulico de fabricación europea.....	47
Figura N° 2.30. Ariete hidráulico utilizado en el sudeste de Asia.....	47
Figura N° 2.31. Ariete hidráulico fabricado a partir de piezas especiales de conductos.....	48
Figura N° 2.32. Sistema de Arietes hidráulicos en paralelo.....	48
Figura N° 2.33. Dos Arietes hidráulicos colocados en serie.....	49
Figura N° 2.34. Entrada de la tubería de impulsión.....	51
Figura N° 2.35. Instalación óptima del tubo de impulsión.....	51
Figura N° 2.36. Distribución de la velocidad en la sección transversal de la tubería.....	54
Figura N° 2.37. Ubicación del tramo 1-2.....	60
Figura N° 2.38. Variación teórica de la presión en la válvula.....	64
Figura N° 2.39. Variación real de la presión en la válvula.....	64
Figura N° 2.40. Carrera de la válvula de impulso.....	67
Figura N° 2.41. Presiones máxima y mínima de la instalación.....	70
Figura N° 3.1. Sitio de prueba del prototipo de ariete hidráulico.....	74
Figura N° 3.2. Ubicación de la bomba de ariete de 4".	79
Figura N° 3.3. Dimensiones de la tubería de alimentación.....	83
Figura N° 3.4. Pérdidas locales de la instalación.....	86
Figura N° 3.5. Caudal necesario para alimentar el ariete hidráulico.....	88
Figura N° 3.6. Área de salida de la válvula de impulso.....	89

Figura N° 3.7. Dimensiones del pie de la válvula de impulso en mm.	96
Figura N° 3.8. Dimensiones de la pesa en mm.....	97
Figura N° 3.9. Dimensiones del caucho en mm.	98
Figura N° 4.1. Curva altura de descarga vs caudal de descarga. Ariete hidráulico de 1". .	106
Figura N° 4.2. Caudal de descarga vs Altura de descarga para W_1	108
Figura N° 4.3. Caudal de descarga vs Altura de descarga para W_2	108
Figura N° 4.4. Altura de descarga vs Caudal de descarga.....	109
Figura N° 4.5. Golpes por minuto vs Altura de descarga.....	110

LISTA DE TABLAS

Tabla N° 2.1. Comparación de las bombas según su fuente de suministro de energía.....	19
Tabla N° 3.1. Materiales para la construcción del prototipo de ariete hidráulico.	73
Tabla N° 3.2. Datos máximos obtenidos de la prueba en campo del prototipo de 1".	76
Tabla N° 3.3. Detalle de datos obtenidos de la prueba en campo prototipo de 1".	76
Tabla N° 3.4. Resultados de la prueba de funcionamiento del prototipo de 1".	76
Tabla N° 3.5. Referencial de capacidades de bombeo “Metalúrgica San José”.	78
Tabla N° 3.6. Dimensiones de la bomba de ariete.	79
Tabla N° 3.7. Datos obtenidos a diferentes alturas con W_1 . Ariete de 4".	81
Tabla N° 3.8. Datos obtenidos a diferentes alturas con W_2 . Ariete de 4".	81
Tabla N° 3.9. Resultados de prueba en campo. Ariete hidráulico de 4".	81
Tabla N° 3.10. Cotización 1 de bomba eléctrica “LEO”.	101
Tabla N° 3.11. Cotización 2 de bomba eléctrica “PEDROLLO”.	101
Tabla N° 3.12. Cotización 3 de bomba eléctrica “PEDROLLO”.	102
Tabla N° 3.13. Consumo anual en Bs. Bombas eléctricas.	103
Tabla N° 3.14. Kits de bombeo solar.	103
Tabla N° 3.15. Cotización de bomba con energía fotovoltaica.	104
Tabla N° 3.16. Alternativas de bombas de ariete.	104
Tabla N° 3.17. Cotización de bombas de ariete.	105
Tabla N° 4.1. Caudal de descarga. Prototipo de una pulgada.	106
Tabla N° 4.2. Comparación de valores teóricos calculados y obtenidos en campo.	107
Tabla N° 4.3. Costos de inversión y operación de alternativas propuestas.	110
Tabla N° 4.4. Resumen comparativo de costos de inversión y operación.	111