

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE BOMBEO HIDRÁULICO PARA
REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA EN UNA BOMBA DE ARIETE

JUAN PABLO ARDILA MEDINA

BRAYAN STIVEN CAMACHO PAEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2026

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE BOMBEO HIDRÁULICO PARA
REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA EN UNA BOMBA DE ARIETE

JUAN PABLO ARDILA MEDINA

BRAYAN STIVEN CAMACHO PAEZ

Trabajo de grado para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO

Director

Ph.D Laura Botero Bolivar

Ingeniera aeronáutica

Codirector

Ph.D Jabid Eduardo Quiroga

Magister, Ingeniero mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2026

DEDICATORIA

A mis padres, Claudia Patricia Páez y Oscar Albeiro Camacho, quienes han sido guía, mi ejemplo de trabajo y constancia, brindándome siempre su apoyo en cada meta que me he propuesto. A mi hermano Jhon Fredy Camacho, por siempre estar conmigo en los momentos de adversidad y por ser mi equipo durante este largo camino. A mis abuelos Rosa María Guerrero, Luis Camacho y Oliva Páez por su amor y cariño, y por siempre ser un refugio en momentos de crisis. A toda mi familia por su apoyo, por ser un ejemplo y por creer en mí. Finalmente, a mis amigos y todas las personas que hicieron parte de esta etapa de mi vida.

Brayan Stiven Camacho Páez

A mis padres, Leonardo Ardila Palencia y Luz Dary Medina Cañas. A ti, papá, por ser mi más grande ejemplo de fortaleza, por tu apoyo incondicional y por esa fe inquebrantable que depositaste en mí incluso en los momentos en que dudé; gracias a ti he llegado hasta el final de este camino. A ti, mamá, por tu ternura, tus palabras de aliento y por enseñarme que la perseverancia todo lo puede.

A mi hermano, Sergio Daniel Ardila, por ser mi compañero de vida, por su comprensión en mis ausencias y por recordarme siempre que los sueños se cumplen con trabajo en equipo.

A mi familia y amigos, que con su cariño y confianza fueron el motor silencioso pero fundamental para culminar esta meta. A todos, gracias por ser parte de este logro.

Juan Pablo Ardila Medina

AGRADECIMIENTOS

A la profesora Laura Botero Bolívar, por sus consejos, confianza y apoyo a lo largo de este proceso.

A el profesor Jabid Eduardo Quiroga por brindarnos su conocimiento en cuanto a sistemas de bombeo hidráulicos y permitirnos desarrollar nuestro proyecto de grado.

A los técnicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica, por su disposición, apoyo técnico y acompañamiento en la ejecución de este proyecto.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, por formarnos como ingenieros mecánicos.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	17
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	18
2. JUSTIFICACIÓN PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA.....	19
3. OBJETIVOS.....	20
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	20
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
4. MARCO TEÓRICO.....	21
4.1 HIDRÁULICA.....	21
4.2 ENERGÍA HIDRÁULICA.....	21
4.3 BOMBA HIDRÁULICA.....	21
4.4 GOLPE DE ARIETE.....	22
4.5 FENÓMENO DEL GOLPE DE ARIETE.....	22
4.6 BOMBA DE ARIETE HIDRÁULICO.....	23
4.7 ASPECTOS GENERALES DE UN ARIETE HIDRAULICO.....	24
4.7.1 Cuerpo del ariete.....	24
4.7.2 Válvula de impulso.....	24
4.7.3 Válvula de descarga.....	25
4.7.4 Cámara de presión.....	26
4.7.5 Constante elástica del resorte de la válvula de impulsión (K).....	26
4.7.6 Carrera de la válvula de impulsión.....	27
4.8 FUNCIONAMIENTO DEL GOLPE DE ARIETE.....	27
4.9 VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LA ONDA DE PRESIÓN.....	33
4.10 SOBREPRESIÓN GENERADA POR CIERRE DE UNA VÁLVULA.....	34
4.10.1 Cierre instantáneo.....	34

4.10.2 Cierre rápido.....	34
4.10.3 Cierre lento.....	34
4.11 CARACTERIZACIÓN DEL FLUIDO.....	35
4.11.1 Densidad.....	35
4.11.2 Peso específico.....	36
4.11.3 Viscosidad dinámica.....	36
4.11.4 Viscosidad cinemática.....	36
5. METODOLOGÍA.....	38
5.1 ESTRUCTURACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO Y CONDICIONES DE OPERACIÓN	
38	
5.1.1 Supuestos del modelo matemático.....	38
5.1.2 Fórmulas empleadas en el modelo matemático.....	39
5.1.3 Relaciones complementarias empleadas en la implementación del modelo.....	46
5.2 ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL ARIETE HIDRÁULICO BAJO DIFERENTES	
CONFIGURACIONES DE OPERACIÓN.....	48
5.3 VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO FRENTE A OTRAS INVESTIGACIONES	49
5.4 VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO FRENTE A DIFERENTES	
CONFIGURACIONES DEL PROTOTIPO PROPUESTO.....	50
5.5 VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO PARA EL CASO DE ESTUDIO REAL..	51
5.6 METODOLOGÍA PARA LA TOMA DE DATOS FRENTE AL PROTOTIPO CONSTRUIDO	
53	
5.7 CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL PROTOTIPO DE BOMBA DE ARIETE.....	54
5.7.1 Accesorios del sistema.....	54
5.7.2 Altura de alimentación.....	55
5.7.3 Tubería de alimentación.....	55
5.7.4 Caracterización de la tubería.....	56
5.7.5 Tubería de descarga.....	58

5.7.6 Manómetros.....	58
5.7.7 Calibración de caudalímetro (Arduino uno).....	59
5.7.8 Válvula de impulsión o de pie.	60
5.7.9 Resorte válvula de impulsión.	60
5.7.10 Cuerpo de bomba de ariete.	61
5.8 METODOLOGÍA PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS PARA EL CASO DE ESTUDIO REAL	62
5.8.1 Ubicación geográfica.	62
5.8.2 Reservorio de alimentación.	63
5.8.3 Tanque de descarga.	64
5.8.4 Resorte válvula de impulsión.	64
5.8.5 Recipiente acumulador.	66
5.8.6 Cuerpo del ariete.	66
5.9 APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MODELO DEL ARIETE HIDRAULICO.....	68
5.9.1 Método Once-at-a-Time (OAT).	69
5.9.2 Sensibilidad diferencial (Differential Sensitivity).....	69
5.9.3 Índice de sensibilidad (Sensitivity Index – SI).	69
5.9.4 Factor de importancia (Importance Factor – IF).....	69
6. RESULTADOS	70
6.1 VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO FRENTE A OTRAS INVESTIGACIONES.....	70
6.2 RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL PROTOTIPO PROPUESTO	82
6.3 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA TOMA DE DATOS DEL PROTOTIPO Y EL MODELO MATEMÁTICO	83
6.3.1 Efecto de las características del ariete respecto al rendimiento del sistema.	83
6.3 RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	96
6.3.1 Variable más influyente en el fenómeno del ariete.	98

6.3.2 Mejor configuración para el prototipo respecto a eficiencia.	99
6.3.3 Mejor configuración para el prototipo respecto a caudal perdido.....	99
6.4 RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL CASO DE PROYECCIÓN REAL	100
6.4.1 Mejor configuración para el caso de estudio real respecto a eficiencia.	101
6.4.2 Elección de la mejor configuración del caso de estudio real que minimiza el caudal perdido.....	101
7. CONCLUSIONES	102
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
ANEXOS.....	106

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Efecto del golpe de ariete	22
Figura 2. Válvula de pie o impulsión	25
Figura 3. Válvula de descarga	25
Figura 4. Recipiente acumulador	26
Figura 5. Resorte de válvula de impulsión	27
Figura 6. Régimen estacionario del flujo en la tubería	28
Figura 7. Cierre súbito de la válvula en el instante inicial	28
Figura 8. Propagación de la onda de presión hasta la mitad de la tubería	29
Figura 9. Inicio de la inversión del flujo en la tubería	29
Figura 10. Propagación de la onda de presión hacia la válvula	30
Figura 11. Inversión del flujo y generación de la onda de depresión	30
Figura 12. Avance de la depresión en la tubería	31
Figura 13. Depresión en toda la tubería y reinicio del flujo	31
Figura 14. Recuperación del flujo en la mitad izquierda de la tubería	32
Figura 15. Final del ciclo de oscilación del golpe de ariete	32
Figura 16. Tanque de alimentación	55
Figura 17. Montaje tubería de descarga	58
Figura 18. Manómetro HINTF	59
Figura 19. Caudalímetro de turbina (YF-S201B G1/2).....	59
Figura 20. Válvula de impulsión de bronce	60
Figura 21. Resorte válvula de impulsión	61
Figura 22. Montaje cuerpo del ariete hidráulico	62
Figura 23. Ubicación geográfica	63
Figura 24. Reservorio de alimentación	63
Figura 25. Tanque de descarga	64
Figura 26. Resorte válvula de impulsión	65
Figura 27. Recipiente acumulador	66
Figura 28. Cuerpo del ariete	67

Figura 29. Experimentales de Quiroga-Méndez et al. (2013) y teóricos (modelo matemático) respecto a eficiencia total (414 N/m)	72
Figura 30. Experimentales de Quiroga-Méndez et al. (2013) y teóricos (modelo matemático) respecto al caudal perdido (414 N/m).....	73
Figura 31. Experimentales de Quiroga-Méndez et al. (2013) y teóricos (modelo matemático) respecto a eficiencia total (498 N/m)	75
Figura 32. Experimentales de Quiroga-Méndez et al. (2013) y teóricos (modelo matemático) respecto al caudal perdido (498 N/m).....	76
Figura 33. Experimentales de Quiroga-Méndez et al. (2013) y teóricos (modelo matemático) respecto a eficiencia total (538 N/m)	78
Figura 34. Experimentales de Quiroga-Méndez et al. (2013) y teóricos (modelo matemático) respecto a caudal perdido (538 N/m).....	79
Figura 35. Experimentales de Quiroga-Méndez et al. (2013) y teóricos (modelo matemático) respecto a eficiencia total (593 N/m)	81
Figura 36. Experimentales de Quiroga-Méndez et al. (2013) y teóricos (modelo matemático) respecto a caudal perdido (593 N/m).....	82
Figura 37. Eficiencia total teórica en función de la carrera (50 y 56 N/m).....	85
Figura 38. Caudal perdido teórico en función de la carrera (50 y 56 N/m).....	85
Figura 39. Eficiencia total teórica en función de la carrera (52 y 54 N/m).....	87
Figura 40. Caudal perdido teórico en función de la carrera (52 y 54 N/m).....	87
Figura 41. Eficiencia total teórica en función de la válvula de impulsión (50 y 56 N/m)	89
Figura 42. Caudal perdido teórico en función de la válvula de impulsión (50 y 56 N/m).....	90
Figura 43. Eficiencia total teórica en función de la válvula de impulsión (52 y 54 N/m)	91
Figura 44. Caudal perdido teórico en función de la válvula de impulsión (52 y 54 N/m).....	92
Figura 45. Eficiencia total teórica en función de la válvula de descarga (50 y 56 N/m)	93
Figura 46. Caudal perdido teórico en función de la válvula de descarga (50 y 56 N/m)	94
Figura 47. Eficiencia total teórica en función de la válvula de descarga (52 y 54 N/m)	95
Figura 48. Caudal perdido teórico en función de la válvula de descarga (52 y 54 N/m)	96

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Propiedades del agua en unidades SI a 101 kPa (abs)	37
Tabla 2. Datos de entrada del modelo matemático	49
Tabla 3. Datos de entrada del prototipo propuesto	53
Tabla 4. Accesorios hidráulicos usados en el montaje	54
Tabla 5. Dimensiones geométricas de tuberías Schedule 40	56
Tabla 6. Factor de fricción para diámetros nominales de la tubería	57
Tabla 7. Rugosidad absoluta para diferentes materiales	57
Tabla 8. Propiedades del resorte	61
Tabla 9. Características del resorte	65
Tabla 10. Datos de accesorios hidráulicos	67
Tabla 11. Datos de entrada para la proyección del sistema	68
Tabla 12. Resultados obtenidos con el resorte 414 N/m- Quiroga-Méndez et al. (2013)	71
Tabla 13. Resultados obtenidos con el resorte 414 N/m- Modelo matemático	71
Tabla 14. Resultados obtenidos con el resorte 498 N/m- Quiroga-Méndez et al. (2013)	74
Tabla 15. Resultados obtenidos con el resorte 498 N/m- Modelo matemático	74
Tabla 16. Resultados obtenidos con el resorte 538 N/m- Quiroga-Méndez et al. (2013)	77
Tabla 17. Resultados obtenidos con el resorte 538 N/m- Modelo matemático	77
Tabla 18. Resultados obtenidos con el resorte 593 N/m- Quiroga-Méndez et al. (2013)	80
Tabla 19. Resultados obtenidos con el resorte 593 N/m- Modelo matemático	80
Tabla 20. Resultados toma de datos	82
Tabla 21. Teórico vs experimental (50 N/m)	83
Tabla 22. Resultados del modelo matemático para un resorte de 50 N/m a diferentes carreras(s)	84
Tabla 23. Resultados del modelo matemático para un resorte de 56 N/m a diferentes carreras(s)	84
Tabla 24. Resultados del modelo matemático para un resorte de 52 N/m a diferentes carreras (s)	86
Tabla 25. Resultados del modelo matemático para un resorte de 54 N/m a diferentes carreras (s)	86

Tabla 26. Resultados del modelo matemático para un resorte de 50 N/m a un diámetro de impulsión variable	88
Tabla 27. Resultados del modelo matemático para un resorte de 56 N/m a un diámetro de impulsión variable	89
Tabla 28. Resultados del modelo matemático para un resorte de 52 N/m a un diámetro de impulsión variable	90
Tabla 29. Resultados del modelo matemático para un resorte de 54 N/m a un diámetro de impulsión variable	91
Tabla 30. Resultados del modelo matemático para un resorte de 50 N/m a un diámetro de descarga variable	93
Tabla 31. Resultados del modelo matemático para un resorte de 56 N/m a un diámetro de descarga variable	93
Tabla 32. Resultados del modelo matemático para un resorte de 52 N/m a un diámetro de descarga variable	95
Tabla 33. Resultados del modelo matemático para un resorte de 54 N/m a un diámetro de descarga variable	95
Tabla 34. Método OAT.....	96
Tabla 35. Método Differential sensitivity	97
Tabla 36. Resultados del método de factor de importancia-Sensitivity Index.....	97
Tabla 37. Resultados del método de factor de importancia-IF.....	98
Tabla 38. Resultados generales del análisis de sensibilidad	98
Tabla 39. Elección de la configuración más eficiente del prototipo.....	99
Tabla 40. Elección de la mejor configuración del prototipo que minimiza el caudal perdido ..	99
Tabla 41. Resultados de la proyección del sistema hidráulico en el caso real	100
Tabla 42. Elección de la configuración más eficiente para el caso de estudio real	101
Tabla 43. Mejor configuración caso de estudio real que minimiza el caudal perdido	101

LISTA DE ANEXOS

Pág.

Anexo A. Planos de válvula de impulsión	106
Anexo B. Planos de válvula de descarga.....	107
Anexo C. Ventana de análisis del modelo matemático	108

GLOSARIO

Ariete hidráulico: Aparato que utiliza el impulso del agua en circulación para impulsar parte del flujo hacia un nivel más alto, sin usar recursos adicionales de energía.

Cámara de aire: Elemento del sistema encargado de almacenar aire comprimido y estabilizar la presión durante el ciclo de operación, permitiendo una descarga más uniforme.

Eficiencia hidráulica: Relación entre la energía aprovechada por el sistema y la energía total disponible en el flujo de agua.

Golpe de ariete: Fenómeno que ocurre cuando una válvula se cierra de forma brusca, generando un incremento de presión que impulsa el agua hacia la cámara de aire y el conducto de descarga.

Huella hídrica: Indicador que cuantifica el volumen de agua utilizado o desperdiciado en un proceso, facilitando la evaluación de su impacto ambiental.

Sostenibilidad: Enfoque orientado a satisfacer las necesidades presentes mediante un uso eficiente de los recursos, sin afectar la disponibilidad para futuras generaciones.

Válvula de impulso: Dispositivo que opera de forma automática, abriéndose y cerrándose durante el ciclo del ariete para regular el flujo y generar el incremento de presión.

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE BOMBEO HIDRÁULICO PARA REDUCCIÓN DE PERDIDAS DE AGUA EN UNA BOMBA DE ARIETE*

AUTOR: BRAYAN STIVEN CAMACHO PÁEZ.
JUAN PABLO ARDILA MEDINA**

PALABRAS CLAVE: DISEÑO, EVALUACIÓN, BOMBA DE ARIETE, ENERGÍA HIDRÁULICA, EFICIENCIA, REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS.

DESCRIPCIÓN:

El ariete hidráulico emplea el empuje del agua en circulación para impulsar una parte del flujo hacia una elevación mayor sin necesitar fuente energética externa. Este sistema es adecuado en zonas rurales donde se requiere transportar agua sin acceso a electricidad. Con el fin de potenciar su eficiencia y reducir las pérdidas de agua, este proyecto plantea el diseño y evaluación de un mecanismo de bombeo hidráulico, fundamentado en el principio de la bomba de ariete. Se examinan las causas de las pérdidas y se proponen mejoras en el diseño estructural y de las válvulas

El estudio contempla la construcción y prueba experimental de un prototipo a escala, evaluando el caudal útil, la altura de elevación y la eficiencia global. Finalmente, se desarrolla un análisis técnico y económico que evidencia la viabilidad y el impacto de la propuesta en la minimización de pérdidas y el aprovechamiento del recurso hídrico.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería mecánica. Laura Botero Bolívar. Ingeniera Aeronáutica. Jabid Eduardo Quiroga Ingeniero mecánico.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND EVALUATION OF A HYDRAULIC PUMPING SYSTEM FOR REDUCING WATER LOSSES IN A HYDRAULIC RAM PUMP*

AUTHOR: BRAYAN STIVEN CAMACHO PÁEZ.

JUAN PABLO ARDILA MEDINA**

KEY WORDS: DESIGN, EVALUATION, HYDRAULIC RAM PUMP, HYDRAULIC ENERGY, EFFICIENCY, WATER LOSS REDUCTION.

DESCRIPTION:

The hydraulic ram pump uses the momentum of flowing water to drive a portion of the flow to a higher elevation without requiring an external energy source. This system is suitable for rural areas where water must be transported without access to electricity.

In order to enhance its efficiency and reduce water losses, this project proposes the design and evaluation of a hydraulic pumping mechanism based on the principle of the ram pump. The causes of losses are examined and improvements in structural and valve design are proposed.

The study includes the construction and experimental testing of a scaled prototype, evaluating useful flow rate, delivery height, and overall efficiency. Finally, a technical and economic analysis is carried out, demonstrating the feasibility and impact of the proposal in minimizing losses and improving the use of water resources.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería mecánica. Laura Botero Bolívar. Ingeniero Aeronáutica. Jabid Eduardo Quiroga Ingeniero mecánico.

INTRODUCCIÓN

El abastecimiento de agua en zonas rurales o de difícil acceso representa un desafío importante, especialmente cuando no se dispone de energía eléctrica para operar sistemas de bombeo convencionales. En este contexto, el uso de tecnologías que aprovechen fuentes de energía renovable se convierte en una alternativa viable para el suministro de agua. Entre estas tecnologías se encuentra la bomba de ariete hidráulico, un dispositivo que utiliza la energía del agua en movimiento para elevar una fracción del caudal hacia una altura mayor sin necesidad de motores, electricidad o combustibles.

El desempeño de la bomba de ariete se fundamenta en el fenómeno hidráulico denominado como golpe de ariete, el cual sucede cuando el flujo de agua en una tubería se interrumpe bruscamente, provocando un incremento temporal de presión. Este aumento de presión es utilizado para impulsar parte del agua hacia un nivel alto al de suministro. Gracias a este principio, el sistema puede funcionar de manera automática y continua, generando ciclos o pulsaciones de bombeo que permiten llevar agua a mayores alturas empleando únicamente la energía hidráulica disponible.

A pesar de ser una tecnología desarrollada hace varios siglos, el ariete hidráulico continúa siendo objeto de estudio debido a sus múltiples ventajas, entre las que se destacan su simplicidad mecánica, bajo costo de operación y reducido impacto ambiental. Estas características lo convierten en una alternativa adecuada para comunidades rurales o agrícolas donde el acceso a la energía es limitado. Además, el estudio de su funcionamiento permite analizar fenómenos hidráulicos importantes relacionados con el flujo en tuberías y los cambios de presión generados durante el proceso de bombeo.

El desempeño de una bomba de ariete depende de diversos factores relacionados con el diseño del sistema y las características de sus componentes. Elementos como la válvula de impulso, la válvula de retención, la cámara de presión y el cuerpo del ariete influyen directamente en parámetros de funcionamiento como el caudal bombeado, la frecuencia de pulsaciones y la eficiencia del sistema.

En el presente trabajo se estudia el comportamiento de una bomba de ariete hidráulico mediante la evaluación de un modelo matemático y la construcción de un prototipo. A partir de las pruebas realizadas con el modelo matemático se obtendrán datos que permitirán analizar el funcionamiento del sistema y comparar los resultados experimentales con los obtenidos mediante un modelo matemático del dispositivo. De esta manera, se pretende contribuir a una mejor comprensión del comportamiento del ariete hidráulico y a la evaluación de su desempeño bajo determinadas condiciones de operación.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El suministro de agua en zonas rurales continúa siendo un desafío presente, sobre todo por la falta de infraestructura eléctrica y por los altos costos que tienen los sistemas de bombeo convencionales. En este sentido, la bomba de ariete hidráulico aparece como una alternativa práctica y sostenible, ya que funciona aprovechando únicamente la energía del agua en movimiento para impulsar el líquido a mayores alturas, y no necesita combustibles ni electricidad. Esto la convierte en una opción ideal para usar en fincas y en comunidades que están alejadas de las ciudades.

Sin embargo, aunque es una herramienta útil y económica, este tipo de bomba tiene un problema importante: durante su funcionamiento descarga una parte considerable del agua que toma, y esa agua se pierde sin ser utilizada. Esto hace que el caudal disponible sea menor y que no se aproveche al máximo el recurso. Estas pérdidas pueden afectar actividades como el riego de cultivos y el suministro para animales, sobre todo en zonas donde el agua no es abundante y donde cada litro cuenta para las labores del campo.

Existen algunos diseños y configuraciones que intentan que se desperdicie menos agua, y que buscan mejorar el aprovechamiento del caudal, pero todavía no hay una solución clara ni definitiva que responda de forma efectiva a este problema y que al mismo tiempo mantenga la sencillez y el bajo costo que hacen valiosa a la bomba de ariete.

Por todo esto, surge la pregunta:

¿Qué tipo de dispositivo o configuración se puede diseñar o adaptar para recuperar o disminuir el caudal de agua desperdiciado por la operación de la bomba de ariete, manteniendo o mejorando su rendimiento global?

2. JUSTIFICACIÓN PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Con el fin de poder entregar la mayor cantidad de agua posible sin la necesidad de desperdiciar grandes cantidades de agua, es necesario realizar el diseño de una bomba de ariete mejorada, la cual minimice las pérdidas cuando entre en funcionamiento. Este nuevo diseño se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente con el ODS 6, “Agua limpia y saneamiento”, y el ODS 12, “Producción y consumo responsables”. La sostenibilidad del proyecto se refleja en el uso eficiente del recurso hídrico, ya que, al reducir el caudal de agua desperdiciada, la bomba permite aprovechar un mayor volumen de agua útil. En comparación con una bomba hidráulica convencional, este sistema presenta una menor huella hídrica, contribuyendo así a una gestión más responsable de los recursos y a la disminución del impacto ambiental asociado a su operación.

La implementación de este diseño implica siguientes beneficios importantes. En primer lugar, la mayor eficiencia hídrica. En segundo lugar, se conseguirá el ahorro de recursos naturales para las zonas con una fuente de agua limitada. En tercer lugar, reducción de costos sin utilizar energía eléctrica ni combustibles para la operación. Todos estos se realizarán con las mismas ventajas en cuanto a durabilidad y simplicidad del ariete normal. Como resultado, en el campo de la agricultura se gana un equipo confiable y económico, el cual le garantiza suficiente agua para sus oficios regulares, mejorando así la productividad y calidad de vida. Además, este diseño también puede beneficiar a comunidades rurales para el suministro de agua doméstica, a pequeños productores ganaderos, a asociaciones comunitarias e incluso a proyectos ambientales en zonas donde se requiere llevar agua a viveros o reservas naturales donde es complicada la adquisición de un sistema de bombeo eléctrico.

Adicionalmente, este proyecto tiene un valor académico al contribuir al análisis y modelación del efecto transitorio conocido como golpe hidráulico, así como de la eficiencia hidráulica en sistemas de bombeo no convencionales.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y evaluar mediante un prototipo un sistema de bombeo hidráulico basado en la bomba de ariete, orientado a reducir las pérdidas de agua para mejorar la eficiencia en el aprovechamiento del recurso hídrico.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Modelar matemáticamente, a partir de las ecuaciones disponibles en la literatura para la bomba de ariete, su funcionamiento, identificando los parámetros de operación y realizar un análisis de sensibilidad para cada uno de ellos, con el fin de determinar su influencia en el rendimiento hidráulico del sistema.
2. Establecer una solución para reducir la huella hídrica, considerando el parámetro de mayor influencia en el funcionamiento de la bomba de ariete.
3. Evaluar, mediante un prototipo con configuración de una sola válvula de impulso, la solución propuesta orientada a maximizar el caudal de salida, considerando una altura de suministro de 1 metro.
4. Proyectar la reducción de huella hídrica en un caso de estudio real con el diseño propuesto, considerando una altura de descarga de mínimo 30 metros.

4. MARCO TEÓRICO

En esta sección se presentarán los principales conceptos que serán claves para el modelamiento de la bomba de ariete.

4.1 HIDRÁULICA

La hidráulica es la rama de la física que estudia la mecánica de los fluidos, examina las leyes que gobiernan el movimiento de los líquidos y los métodos para el adecuado aprovechamiento del agua. Su estudio se organiza en tres campos principales. La hidrostática se encarga del análisis de los líquidos en estado de reposo. La cinemática estudia el movimiento de las partículas del agua sin tener en cuenta las masas ni las fuerzas que lo generan. Por último, la hidrodinámica analiza el comportamiento de los líquidos cuando se encuentran en movimiento (Manual de Hidráulica de Tuberías y Canales, 2013).

4.2 ENERGÍA HIDRÁULICA

Corresponde a la que se obtiene del aprovechamiento de la energía cinética y potencial de la corriente del agua, saltos de agua o mareas (Rivadeneira y Silva, 2013).

4.3 BOMBA HIDRÁULICA

La bomba hidráulica es un equipo impulsa un fluido mediante la conversión de energía mecánica en energía hidráulica. Su función principal consiste en aumentar la presión del líquido para llevarlo desde zonas de baja presión o altura hacia otras de mayor nivel dentro de un sistema hidráulico (Nekrasov, 1968).

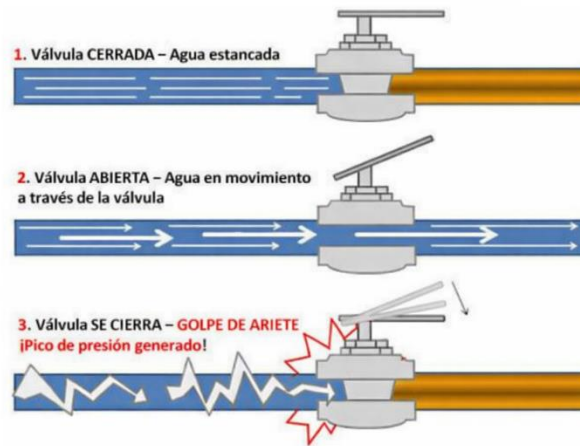
Al transferir energía al fluido, la bomba permite que este se desplace a través de tuberías, superando pérdidas por fricción y diferencias de altura. Debido a esta capacidad, las bombas hidráulicas son ampliamente utilizadas en sistemas de abastecimiento de agua, riego, procesos industriales y transporte de fluidos.

Dependiendo de su principio de funcionamiento, las bombas pueden clasificarse en diferentes tipos. Entre ellas se encuentran las bombas dinámicas y las bombas de desplazamiento positivo, cada una diseñada para aplicaciones específicas dentro de los sistemas hidráulicos.

4.4 GOLPE DE ARIETE

El golpe de ariete corresponde a una sobrecarga de presión que se presenta en las superficies internas de una tubería cuando el flujo de agua cambia bruscamente. Se produce por el accionamiento de cierre o de apertura rápida de un mecanismo de paso, propagándose ondas de carga hidráulica a lo largo del conducto. Según la condición, puede ser positivo (cierre súbito) o negativo (apertura rápida). Este fenómeno genera un pico inicial de presión acompañado de oscilaciones, y resulta fundamental en la base operativa de la bomba de ariete (Meza González, 2019).

Figura 1. Efecto del golpe de ariete



Fuente: R&B PLUMBING & HEATING LTD. Water Hammer – Ask an-Expert. [En línea]. 6 de mayo de 2019. Consultado el 6 de marzo de 2026.

4.5 FENÓMENO DEL GOLPE DE ARIETE

El golpe de ariete es un fenómeno hidráulico que se produce cuando hay un cambio repentino en la velocidad del flujo dentro de una conducción, generando un incremento repentino de presión en el sistema. Este fenómeno suele presentarse cuando una válvula se cierra rápidamente o cuando el flujo del agua es detenido de forma súbita.

Cuando el agua circula por una tubería a cierta velocidad, posee energía cinética asociada a su movimiento. Si el paso del flujo se interrumpe de manera repentina, como ocurre al cerrar una válvula, la masa de agua que se encuentra en movimiento continúa desplazándose por inercia durante un corto intervalo de tiempo. Como consecuencia, el fluido se comprime contra el punto de cierre y se genera una onda de presión que se propaga a lo largo de la tubería.

Este incremento temporal de presión puede alcanzar valores considerablemente altos, dependiendo de factores como la velocidad del flujo, la longitud de la tubería y las propiedades del fluido. En muchos sistemas hidráulicos, el golpe de ariete se manifiesta como un sonido fuerte similar al impacto de un martillo contra la tubería, debido a las ondas de presión que se generan en el interior del conducto.

En el caso de la bomba de ariete hidráulico, este fenómeno no se considera una falla, sino que se utiliza como el principio esencial de operación del sistema. La sobrepresión producida por el cierre rápido de la válvula de impulso permite elevar una porción del agua hacia una altura superior a la del suministro inicial.

4.6 BOMBA DE ARIETE HIDRÁULICO

Creada en 1796 por Joseph Michel Montgolfier, aprovecha el golpe de ariete para elevar agua a mayores alturas sin requerir energía externa. Se destacó por su utilidad en zonas rurales gracias a su sencillez, bajo costo y sostenibilidad, aunque fue desplazada por la electricidad y los motores de bajo precio en el siglo XIX, el ariete hidráulico se mantiene como una opción sostenible y eficiente, destacada por su simplicidad, bajo costo y utilidad (Gutiérrez y Mancebo, 2013).

La bomba de ariete hidráulico es un dispositivo que aprovecha el fenómeno transitorio del golpe de ariete para elevar una fracción del caudal disponible a una cota superior sin requerir energía externa. Su funcionamiento se basa en el cierre rápido de la válvula de impulso, lo cual genera un incremento de presión en la tubería de alimentación que habilita el paso de agua hacia la línea de descarga a través de una válvula de retención y una cámara de aire. En promedio, el caudal de suministro se reparte en caudal bombeado y caudal desperdiciado, por lo cual se cumple el balance:

$$Q_s = Q_d + Q_w$$

donde Q_s es el caudal de suministro, Q_d el caudal útil de descarga y Q_w el caudal descargado por la válvula de impulso.

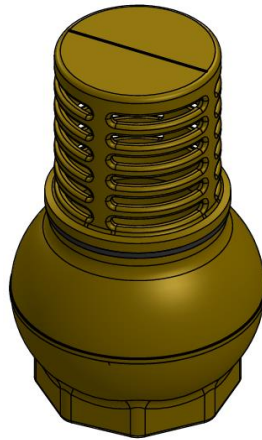
4.7 ASPECTOS GENERALES DE UN ARIETE HIDRAULICO

El ariete hidráulico, independientemente de su diseño o dimensiones, está constituido por varios elementos que permiten su funcionamiento cíclico. Entre ellos se destacan cuatro componentes principales que intervienen directamente en el proceso de bombeo: el cuerpo del ariete, la válvula de impulso, la válvula de descarga y la cámara de presión. Cada uno de estos elementos cumple una función específica dentro del sistema y su interacción es la que permite aprovechar el fenómeno del golpe de ariete para elevar una fracción del caudal hacia una altura superior.

4.7.1 Cuerpo del ariete. Corresponde a la estructura principal del dispositivo y actúa como elemento de unión entre los distintos componentes del sistema. Generalmente está fabricado en materiales resistentes como hierro fundido, acero o aleaciones metálicas, debido a que debe soportar las variaciones de presión generadas durante el ciclo de operación. En su interior se encuentran las conexiones hacia la tubería de alimentación, la válvula de impulsión, la válvula de salida y la cámara de presión. Además de proporcionar soporte mecánico, el cuerpo del ariete permite la correcta conducción del flujo de agua dentro del sistema.

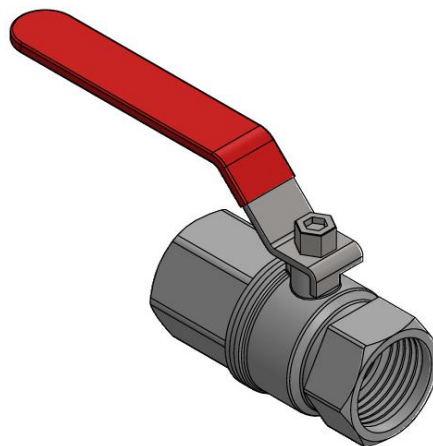
4.7.2 Válvula de impulso. La válvula de impulso, también conocida como válvula de desfogue o válvula de choque, es un elemento fundamental para la operación del ariete hidráulico. Su función principal es abrir y cerrar de manera repetitiva durante el ciclo de operación, permitiendo inicialmente la descarga libre del agua hacia el exterior. Cuando la velocidad del flujo aumenta, la válvula se cierra bruscamente debido a la acción de la presión dinámica del agua y, en algunos diseños, por la acción de un resorte o su propio peso. Este cierre repentino provoca el fenómeno del golpe de ariete, generando un incremento momentáneo de presión en la tubería. Esta válvula juega un papel importante dentro del sistema ya que su diámetro nominal es un factor determinante, ya que condiciona la velocidad del flujo y la intensidad del golpe de ariete, afectando directamente la frecuencia de operación y la eficiencia global del sistema.

Figura 2. Válvula de pie o impulsión



4.7.3 Válvula de descarga. La válvula de descarga, también denominada válvula de retención o válvula check, permite el paso del agua desde el cuerpo del ariete hacia la cámara de presión cuando se produce el aumento de presión generado por el golpe de ariete. Este tipo de válvula funciona en un solo sentido, evitando que el agua almacenada en la cámara regrese hacia el interior del sistema cuando la presión disminuye. De esta forma, contribuye a mantener el flujo dirigido hacia la tubería de impulsión. Es importante destacar que el diámetro de esta válvula juega un papel fundamental en el rendimiento del sistema, ya que influye directamente en las pérdidas de carga y la eficiencia del flujo.

Figura 3. Válvula de descarga



4.7.4 Cámara de presión. La cámara de presión, también conocida como acumulador o cámara de aire, es un recipiente conectado al cuerpo del ariete cuya función es amortiguar las fluctuaciones de presión generadas durante el ciclo de bombeo. En su interior se encuentra una cierta cantidad de aire comprimido que actúa como elemento elástico, permitiendo almacenar parte de la energía hidráulica generada por el golpe de ariete. Este proceso contribuye a estabilizar el flujo hacia la tubería de descarga y mejora la eficiencia del sistema al reducir las variaciones bruscas de presión.

Figura 4. Recipiente acumulador



4.7.5 Constante elástica del resorte de la válvula de impulsión (K). La constante elástica del resorte de la válvula de impulsión (K) es un parámetro fundamental en el comportamiento dinámico del ariete hidráulico, ya que define la relación entre la fuerza ejercida por el resorte y su deformación, de acuerdo con la ley de Hooke. Este elemento interviene directamente en el mecanismo de apertura y cierre de la válvula de impulso, influyendo en la estabilidad del ciclo de operación. Un valor adecuado de la constante elástica permite un cierre oportuno y repetitivo de la válvula, favoreciendo la generación eficiente del golpe de ariete.

Figura 5. Resorte de válvula de impulsión



4.7.6 Carrera de la válvula de impulsión. Corresponde al desplazamiento lineal que realiza la válvula entre su posición de apertura y cierre durante el ciclo de operación del ariete hidráulico. Este parámetro influye directamente en la cantidad de agua descargada, la velocidad de cierre y la intensidad del golpe de ariete. Una carrera adecuada permite un funcionamiento estable y eficiente, mientras que valores excesivos o insuficientes pueden afectar la frecuencia de operación y el rendimiento global del sistema.

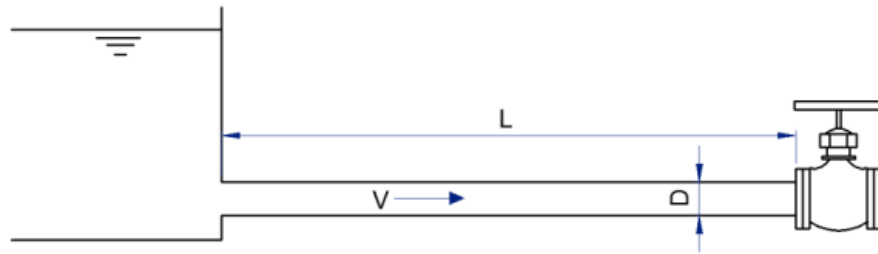
4.8 FUNCIONAMIENTO DEL GOLPE DE ARIETE

El ariete hidráulico opera mediante el cierre súbito de la válvula de impulsión. Inicialmente, esta válvula permanece abierta y permite el paso del agua desde la tubería de impulsión. Cuando la presión se incrementa, la válvula se cierra de manera brusca, originando el golpe de ariete. La sobrepresión impulsa una parte del agua hacia la cámara de aire, donde el fluido se comprime y es conducido hacia la tubería de descarga. Posteriormente, la válvula vuelve a abrirse y el ciclo se repite continuamente. Este proceso, junto con la acción de la válvula de retención, garantiza un flujo constante hacia el depósito de uso final (Meza González, 2019).

Ciclo 1: Estado sin perturbación, régimen estacionario:

En esta etapa, el fluido circula por la tubería con una velocidad V , desplazándose desde el embalse hasta la válvula. Durante este proceso, el diámetro de la tubería permanece constante en su condición normal.

Figura 6. Régimen estacionario del flujo en la tubería

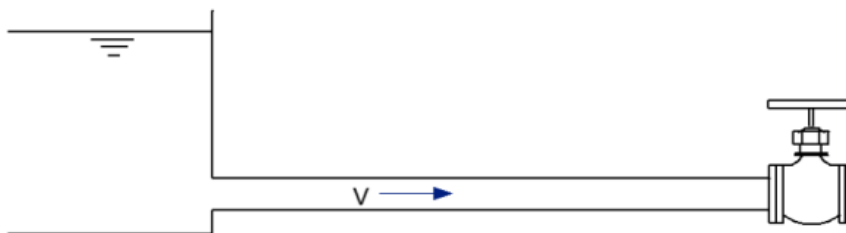


Fuente: MATAIX, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. 2. ed. México: Alfaomega, 1986. p. 315.

Ciclo 2: Instante inicial:

En el instante inicial, la válvula se cierra de forma súbita. Como resultado, la velocidad del fluido empieza a reducirse desde la válvula hacia el resto de la tubería, aunque este fenómeno no se presenta de manera simultánea en toda su longitud.

Figura 7. Cierre súbito de la válvula en el instante inicial

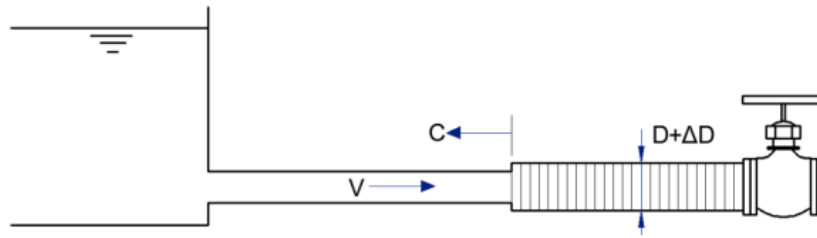


Fuente: MATAIX, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. 2. ed. México: Alfaomega, 1986. p. 315.

Ciclo 3: Instante $t_0/2 = L/2C$:

En este momento, la onda de presión avanza en dirección al depósito con una velocidad C , y su borde alcanza el punto medio del conducto. La porción derecha presenta una dilatación causada por la sobrepresión, mientras que la mitad izquierda conserva su diámetro normal. En esta última zona, el agua continúa desplazándose en dirección a la válvula a una rapidez V ; en cambio, en la mitad del lado derecho, la velocidad del flujo es nula ($V = 0$).

Figura 8. Propagación de la onda de presión hasta la mitad de la tubería



Fuente: MATAIX, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. 2. ed. México: Alfaomega, 1986. p. 315.

Ciclo 4: Instante $t_0 = L/C$:

En este instante, la onda de presión alcanza el embalse. A lo largo de toda la tubería, el fluido se encuentra momentáneamente en reposo ($V = 0$), aunque aún no ha alcanzado una condición de equilibrio, ya que la tubería permanece dilatada. Debido a este estado, el agua comienza a desplazarse nuevamente con velocidad V , pero en sentido opuesto al movimiento inicial. Este reinicio del flujo se produce primero en las secciones más cercanas al estanque.

Figura 9. Inicio de la inversión del flujo en la tubería

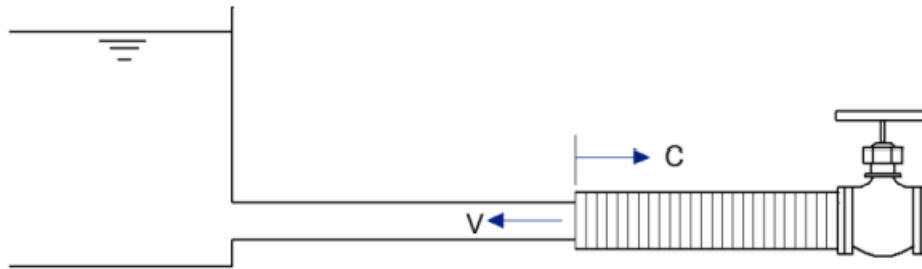


Fuente: MATAIX, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. 2. ed. México: Alfaomega, 1986. p. 315.

Ciclo 5: Instante $\frac{3}{2}t_0 = \frac{3}{2}L/C$:

En este momento, la mitad izquierda de la tubería ha recuperado su diámetro normal. Entretanto, la onda continúa propagándose hacia la derecha con celeridad C . En la sección izquierda de la tubería, el fluido circula con velocidad V .

Figura 10. Propagación de la onda de presión hacia la válvula

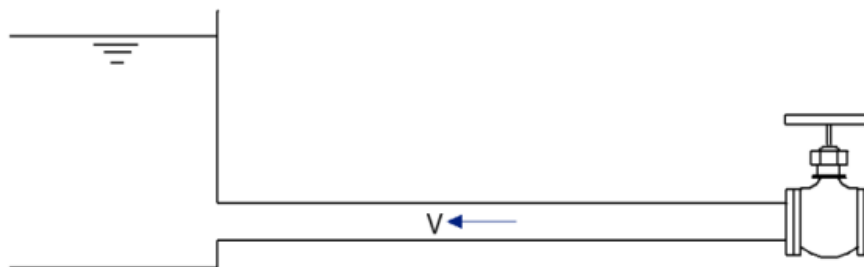


Fuente: MATAIX, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. 2. ed. México: Alfaomega, 1986. p. 315.

Ciclo 6: Instante $2t_0 = 2L/C$:

En este momento, toda la tubería ha recuperado su diámetro normal. El fluido contenido en ella se desplaza desde la válvula hacia el embalse con velocidad V , es decir, en sentido opuesto al presentado en las etapas iniciales. En esta fase ya no existe sobrepresión en ningún tramo de la tubería; sin embargo, debido a la inercia del flujo, la presión continúa disminuyendo. Como resultado, la onda elástica se propaga ahora en forma de depresión desde la válvula hacia el embalse con celeridad C , provocando que el diámetro de la tubería se reduzca por debajo de su valor normal.

Figura 11. Inversión del flujo y generación de la onda de depresión

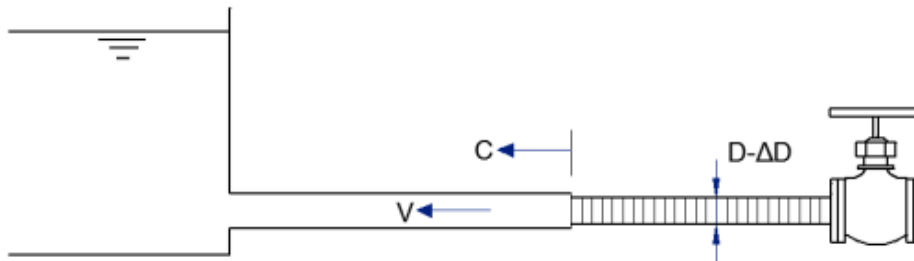


Fuente: MATAIX, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. 2. ed. México: Alfaomega, 1986. p. 315.

Ciclo 7: Instante $\frac{5}{2}t_0 = \frac{5}{2}L/C$:

En este instante, la depresión ha alcanzado la mitad de la tubería. En la mitad derecha, el agua permanece en reposo y sometida a una presión inferior a la normal. Por esta razón, en dicha sección el diámetro de la tubería es menor que su diámetro habitual.

Figura 12. Avance de la depresión en la tubería



Fuente: MATAIX, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. 2. ed. México: Alfaomega, 1986. p. 315.

Ciclo 8: Instante $3t_0 = 3L/C$:

En este momento, el agua en toda la tubería se encuentra en reposo; sin embargo, el sistema aún no está en equilibrio. A partir de allí, el fluido comienza a desplazarse nuevamente desde el embalse hacia la válvula con velocidad V , en dirección hacia la derecha. Durante esta etapa, la depresión se presenta en toda la tubería.

Figura 13. Depresión en toda la tubería y reinicio del flujo

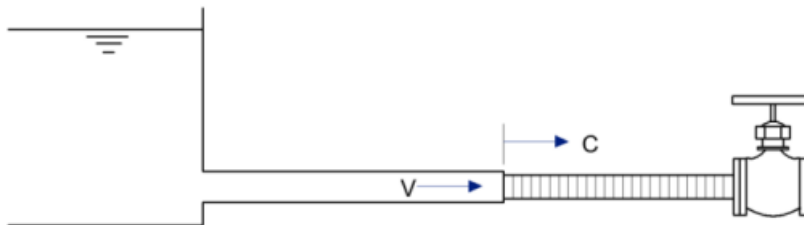


Fuente: MATAIX, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. 2. ed. México: Alfaomega, 1986. p. 315.

Ciclo 9: Instante $\frac{7}{2}t_0 = \frac{7}{2}L/C$:

En este instante, en la mitad izquierda de la tubería el fluido se desplaza hacia la válvula con velocidad V . Por su parte, en la mitad derecha el agua permanece en reposo y sometida a depresión. En consecuencia, el diámetro de la mitad izquierda ya ha recuperado su valor normal, mientras que en la mitad derecha sigue siendo inferior al normal. Además, la celeridad C y la velocidad V actúan en el mismo sentido.

Figura 14. Recuperación del flujo en la mitad izquierda de la tubería



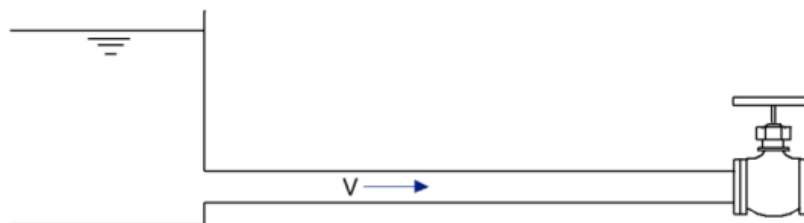
Fuente: MATAIX, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. 2. ed. México: Alfaomega, 1986. p. 315.

Ciclo 10: Instante $4t_0 = 4L/C$

En este punto, toda la tubería ha recuperado su diámetro normal y el fluido se encuentra en movimiento con velocidad V hacia la válvula. Esta condición coincide con la del instante inicial, por lo que se completa un período de oscilación dado por:

$$T = 4t_0 = 4\frac{L}{C}$$

Figura 15. Final del ciclo de oscilación del golpe de ariete



Fuente: MATAIX, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. 2. ed. México: Alfaomega, 1986. p. 315.

Desde el punto de vista teórico, este movimiento oscilatorio podría mantenerse de manera indefinida. No obstante, en la práctica, la deformación de la tubería y la viscosidad del líquido generan disipación de energía, lo que provoca el amortiguamiento progresivo de las oscilaciones.

4.9 VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LA ONDA DE PRESIÓN

Las variaciones locales que ocurren en la presión y la velocidad del flujo dentro de una tubería no permanecen únicamente en el punto donde se originan, sino que se transmiten a lo largo del conducto en forma de ondas. Estas perturbaciones se desplazan con una rapidez cercana a la velocidad del sonido en el fluido, aunque su valor real se ve influenciado por la elasticidad del material de la tubería.

La velocidad con la que se propaga esta onda de presión, conocida como celeridad, depende de diferentes factores asociados tanto al fluido como al sistema de conducción. Entre los principales parámetros se encuentran las propiedades físicas del líquido, la geometría de la tubería y las características elásticas del material del conducto.

En el caso de las tuberías que transportan líquidos, la celeridad de propagación de la onda de sobrepresión puede estimarse mediante la expresión propuesta por Allievi (1903), basada en la teoría de elasticidad aplicada al comportamiento del fluido y de la tubería. Esta relación permite determinar la velocidad con la que las ondas de presión se desplazan a lo largo del sistema hidráulico.

$$C = \frac{\sqrt{\frac{E_o}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{E_o D}{E \delta}}}$$

D = Diámetro interno del tubo.

ρ = Densidad del fluido.

e = Espesor de la pared del tubo.

C = Celeridad o velocidad de propagación de la onda de sobrepresión.

E_o =Módulo de elasticidad volumétrico del agua.

E = Módulo de elasticidad de Young de la tubería.

4.10 SOBREPRESIÓN GENERADA POR CIERRE DE UNA VÁLVULA

La presión puede definirse como la fuerza ejercida sobre una determinada superficie. En los sistemas de tuberías, la presión del fluido puede incrementarse de forma repentina debido al fenómeno denominado golpe de ariete, el cual se presenta cuando el flujo de agua se detiene bruscamente, por ejemplo, al cerrar de manera rápida una válvula.

Cuando el agua se desplaza por una tubería, las partículas del fluido permanecen en movimiento. Si una válvula se cierra de manera súbita, el fluido que se encuentra justo detrás continúa avanzando por inercia y empuja al agua que ya se ha detenido. Esto genera un incremento momentáneo de la presión dentro de la tubería, originando una onda de presión que se propaga a lo largo del conducto.

Esta sobrepresión está determinada principalmente por la velocidad del flujo, por las propiedades del fluido y por la elasticidad del material de la tubería. En algunos casos, los aumentos de presión pueden ser lo suficientemente elevados como para comprometer la integridad del sistema hidráulico, causando daños en tuberías, válvulas o accesorios.

4.10.1 Cierre instantáneo. Corresponde al caso teórico en el que el tiempo de cierre es $t_c = 0$. Aunque esta situación no puede presentarse físicamente, resulta útil desde el punto de vista conceptual, ya que permite comprender con claridad la naturaleza del fenómeno.

4.10.2 Cierre rápido. Se presenta cuando $0 < t_c < t_0 = \frac{2L}{c} = \frac{T}{2}$. En este caso, la presión máxima alcanza el mismo valor que en el cierre instantáneo, aunque la evolución temporal de la presión en la tubería difiere. Esto se debe a que, durante un cierre rápido, la onda de presión no dispone del tiempo suficiente para desplazarse hasta el estanque, reflejarse y regresar a la válvula antes de que transcurra medio ciclo.

4.10.3 Cierre lento. Ocurre cuando $t_c > t_0 = \frac{2L}{c} = \frac{T}{2}$. En esta condición, la presión máxima es inferior a la registrada en los dos casos anteriores, debido a que la onda de depresión alcanza la válvula antes de completarse el medio ciclo, lo que limita el incremento posterior de la presión.

Para estimar el valor de la sobrepresión generada durante este fenómeno se utiliza comúnmente la ecuación de Joukowski, la cual relaciona el cambio de presión con la velocidad del flujo y la velocidad de propagación de la onda de presión en el sistema.

$$P = \rho * C * V$$

Donde:

$P =$ Presión máxima (Mpa)

$C =$ Celeridad de propagación de onda $\frac{m}{s}$

$V =$ Velocidad del fluido $\frac{m}{s}$

$\rho =$ Densidad del fluido $\frac{Kg}{m^3}$

4.11 CARACTERIZACIÓN DEL FLUIDO

La caracterización del fluido de trabajo es fundamental para el correcto funcionamiento de una bomba de ariete, ya que las propiedades físicas del agua determinan directamente la eficiencia del fenómeno de golpe de ariete. Parámetros como la densidad, viscosidad dinámica, cinemática y compresibilidad del agua influyen críticamente en la formación de los pulsos hidráulicos, la frecuencia de operación y el rendimiento global del sistema.

4.11.1 Densidad. Propiedad física fundamental que expresa la relación entre la masa de un fluido y el volumen que ocupa.

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Es importante señalar que la densidad del agua es un parámetro dependiente de la temperatura, existiendo una correlación empírica que cuantifican esta variación, a continuación, se presenta la ecuación para la densidad:

$$\rho_{H2O} = 1000 - \frac{(T - 4)^2}{180}$$

4.11.2 Peso específico. Propiedad que define el peso por unidad de volumen de un fluido, resultante del producto entre su densidad y la aceleración gravitacional.

$$\gamma = \rho * g$$

La aceleración gravitatoria local (g) determina el peso específico, cuyas unidades se expresan en N/m^3 . Para el agua, con una densidad de 1000 kg/m^3 , se obtiene un peso específico de 9810 N/m^3 .

Cabe destacar que el peso específico del agua varía significativamente con la temperatura, mediante una relación empírica bien establecida. La ecuación que describe este comportamiento es:

$$\gamma_{H_2O} = 9810 - \frac{(T - 4)^2}{180}$$

4.11.3 Viscosidad dinámica. Magnitud que representa la oposición interna de un fluido al desplazamiento, evaluando las fuerzas de fricción entre capas fluidas en movimiento.

4.11.4 Viscosidad cinemática. Relación existente entre la viscosidad dinámica y la densidad, que describe el comportamiento del fluido frente a esfuerzos cortantes y su cambio entre regímenes laminar y turbulento. Seguidamente, se exponen las propiedades físicas del agua importantes para el análisis del funcionamiento de la bomba de ariete en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades del agua en unidades SI a 101 kPa (abs)

TABLA A.1 UNIDADES SI [101 kPa (abs)]				
Temperatura (°C)	Peso específico γ (kN/m ³)	Densidad ρ (kg/m ³)	Viscosidad dinámica η (Pa·s)	Viscosidad cinemática ν (m ² /s)
0	9.81	1000	1.75E-03	1.75E-06
5	9.81	1000	1.52E-03	1.52E-06
10	9.81	1000	1.30E-03	1.30E-06
15	9.81	1000	1.15E-03	1.15E-06
20	9.79	998	1.02E-03	1.02E-06
25	9.78	997	8.91E-04	8.94E-07
30	9.77	996	8.00E-04	8.03E-07
35	9.75	994	7.18E-04	7.22E-07
40	9.73	992	6.51E-04	6.56E-07
45	9.71	990	5.94E-04	6.00E-07
50	9.69	988	5.41E-04	5.48E-07
55	9.67	986	4.98E-04	5.05E-07
60	9.65	984	4.60E-04	4.67E-07
65	9.62	981	4.31E-04	4.39E-07
70	9.59	978	4.02E-04	4.11E-07
75	9.56	975	3.73E-04	3.83E-07
80	9.53	971	3.50E-04	3.60E-07
85	9.50	968	3.30E-04	3.41E-07
90	9.47	965	3.11E-04	3.22E-07
95	9.44	962	2.92E-04	3.04E-07
100	9.40	958	2.82E-04	2.94E-07

Fuente: MOTT, Robert L. y UNTENER, Joseph A. Applied Fluid Mechanics. 7 ed. Pearson, 2015, Appendix A, Table A.1.

5. METODOLOGÍA

5.1 ESTRUCTURACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO Y CONDICIONES DE OPERACIÓN

Para analizar el comportamiento de la bomba de ariete se planteó un modelo matemático basado en las ecuaciones que describen el fenómeno del golpe de ariete y el funcionamiento de las válvulas del sistema. Este modelo permite representar el comportamiento hidráulico de la bomba y estimar variables importantes como la frecuencia de pulsos, el caudal perdido, el caudal descargado y la eficiencia.

El modelo se formuló a partir de las expresiones propuestas en la literatura, especialmente en el trabajo de Krol (1951), donde se establecen relaciones entre las variables hidráulicas del sistema. En estas ecuaciones se consideran aspectos como la altura de alimentación, la altura de descarga, las pérdidas de energía en la tubería y el comportamiento de la válvula de impulsión.

Además, el modelo incluye parámetros propios del diseño de la bomba, como la constante del resorte, la carrera de la válvula de impulsión y los diámetros de las tuberías, ya que estos influyen directamente en el funcionamiento del sistema. En base a este conjunto de ecuaciones se obtuvo un modelo que permite estimar el desempeño de la bomba bajo diferentes configuraciones logrando comparar los resultados teóricos con los datos experimentales obtenidos en el prototipo.

5.1.1 Supuestos del modelo matemático. Para simplificar el análisis se adoptaron los siguientes supuestos:

- El fluido de trabajo es agua y sus propiedades se consideran constantes.
- La tubería de alimentación tiene sección transversal uniforme.
- Desarrollo del modelo matemático en siete ciclos
- La altura de alimentación H y la altura de descarga h se consideran constantes para cada condición de operación.
- Las pérdidas hidráulicas del sistema se representan mediante un coeficiente global de pérdidas.
- La válvula de impulsión se caracteriza por su carrera y por el área efectiva de paso.
- El resorte de la válvula se considera de comportamiento lineal.
- La celeridad de la onda de presión se considera constante, o bien se calcula a partir de las propiedades del fluido y de la tubería.
- El coeficiente de descarga C_d se obtuvo a partir del prototipo, con el fin de que el modelo represente mejor el comportamiento real del prototipo

Para aclarar, en este trabajo el valor de C_d no se obtuvo únicamente de la literatura, sino que se estimó a partir de los datos medidos experimentalmente en la bomba, dado que este parámetro influye directamente en la velocidad real del flujo y, por consiguiente, en los caudales y en la eficiencia calculada.

5.1.2 Fórmulas empleadas en el modelo matemático.

Coefficiente de descarga obtenido experimentalmente

$$C_d = \frac{Q_{real}}{Q_{teorico}}$$

Donde:

Q_{real} : es el caudal medido experimentalmente

$Q_{teorico}$: es el caudal teórico calculado

Esta expresión permite ajustar el modelo a la bomba real, ya que incorpora el efecto de las pérdidas y de las condiciones no ideales observadas experimentalmente.

Coefficiente de resistencia asociado a la descarga

$$R = \frac{1}{C_d^2}$$

Donde:

R : es el coeficiente de resistencia asociado al paso por la válvula.

Fuerza de arrastre de la válvula de impulso

$$F = \rho v^2 \cdot A$$

Donde:

ρ : = es la densidad del agua.

v : es la velocidad del flujo.

A : es el área sobre la cual actúa el flujo.

Para una válvula tipo disco, Kroll emplea:

$$F = C_a(\rho v^2 \cdot A)$$

Donde:

C_a : es el coeficiente de arrastre.

En este trabajo se toma:

$$C_a = 1.17$$

Fuerza debida al resorte

$$F = W = K_r \cdot s$$

Donde:

K_r : es la constante del resorte.

s : es la carrera de la válvula.

Coefficiente global de perdidas

$$Z = 1 + \sum k + f \left(\frac{L}{D} \right) + R$$

Donde:

k : es el coeficiente de pérdidas menores.

f : es el factor de fricción.

L : es la longitud de la tubería de alimentación.

D : es el diámetro de la tubería de alimentación.

Esta ecuación agrupa las pérdidas principales del sistema en un solo término.

Pérdida de carga durante el periodo de bombeo

$$h_r = \frac{v^2}{2g} \left[f \frac{L}{D} + \sum k \right] \left(1 - \frac{h}{h_{max}} \right)$$

Donde:

f : es el factor de fricción.

h_{max} : es la altura máxima teórica producida por el ariete.

Altura máxima teórica del ariete

$$h_{max} = \frac{(V_{2d}) * c}{g}$$

Donde:

V_{2d} : es la velocidad real del flujo considerando pérdidas.

g : es la aceleración de la gravedad.

c : es la celeridad de la onda de presión.

Velocidad de la tubería de alimentación

$$V_{2d} = C_d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H}{Z}}$$

Donde:

H : es la altura de alimentación.

Energía cinética disponible

$$E_c = \left(\frac{\gamma \cdot A \cdot L}{2g} \right) \cdot V_{2d}^2$$

Donde:

γ : es el peso específico del agua.

A : es el área de la tubería de alimentación.

Energía cinética perdida por compresión

$$E_{cp} = \left(\frac{\gamma \cdot A \cdot L \cdot g}{2c^2} \right) \cdot (h + h_r)^2$$

Donde:

c : es la celeridad de la onda de presión.

h : es la altura de descarga.

h_r : es la pérdida de carga en la descarga.

Cantidad de agua descargada por ciclo

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

Tiempo del primer tramo del ciclo

$$t_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot L \cdot y}{g \cdot H}}$$

Donde:

y : es la distancia de retroceso del agua en la tubería de impulso.

Velocidad al final del primer tramo

$$V_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H \cdot y}{L}}$$

Velocidad disponible por altura de alimentación

$$V_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H}{Z}}$$

Velocidad requerida para cerrar la válvula

$$V_2 = \sqrt{\frac{W \cdot g}{A_v \cdot \gamma \cdot C_d}}$$

Donde:

W : es la fuerza debido al resorte.

γ : es el peso específico del agua.

Tiempo del segundo tramo

$$t_2 = \frac{L}{\sqrt{2g \cdot H \cdot Z}} \ln \left(\frac{\left(1 + \sqrt{\frac{W \cdot Z}{2A_v \cdot H \cdot \gamma \cdot C_d}} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{y \cdot Z}{L}} \right)}{\left(1 - \sqrt{\frac{W \cdot Z}{2A_v \cdot H \cdot \gamma \cdot C_d}} \right) \left(1 + \sqrt{\frac{y \cdot Z}{L}} \right)} \right)$$

Cantidad de agua perdida en el segundo tramo

$$Q_2 = \left(\frac{\gamma \cdot A \cdot L}{Z} \right) \ln \left(\frac{\left(\frac{2g \cdot H}{Z} - \frac{2g \cdot H \cdot y}{L} \right)}{\left(\frac{2g \cdot H}{Z} - \frac{W \cdot g}{A_v \cdot \gamma \cdot C_d} \right)} \right)$$

Condición límite de cierre de válvula

$$\frac{W \cdot g}{A_v \cdot \gamma \cdot C_d} = \frac{2g \cdot H}{Z}$$

Se obtiene la siguiente relación:

$$Vel\ requerida = Vel\ disponible$$

Tiempo del tercer tramo

$$t_3 = \left(\frac{3L \cdot s \sqrt{\frac{W \cdot g}{A_v \cdot \gamma \cdot C_d}}}{H \cdot g^2 \left(1 - \frac{W \cdot Z}{2A_v \cdot H \cdot \gamma \cdot C_d} \right)} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Cantidad de agua perdida en el tercer tramo

$$Q_3 = \gamma \cdot A \cdot V_3 \cdot t_3$$

Donde:

V_3 : es la velocidad del flujo en esta etapa del proceso.

t_3 : es el tiempo característico correspondiente.

En este punto se asume:

$$V_2 = V_3$$

Tiempo del cuarto tramo

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

Velocidad al final del cuarto tramo

$$V_4 = V_3 - (h + h_r) \frac{g}{c}$$

Donde:

V_3 : es la velocidad al inicio del cuarto tramo.

Tiempo del quinto tramo

$$t_5 = \frac{L}{(h + h_r)g} \left(\sqrt{\frac{W \cdot g}{A_v \cdot \gamma \cdot C_d}} - \frac{(h + h_r)g}{c} \right)$$

Tiempo del sexto tramo

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

Velocidad negativa al final del sexto tramo

$$V_6 = -\frac{(h + h_r)g}{c}$$

Tiempo del séptimo ciclo

$$t_7 = \frac{L(h + h_r)}{H \cdot c}$$

Distancia de retroceso del agua

Aquí se hace:

$$V_1 = V_6$$

Entonces:

$$y = \frac{(h_r + h)^2 L \cdot g}{2H \cdot c^2}$$

Tiempo total del ciclo

$$T = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7)$$

Donde:

$t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7$: son los tiempos parciales del modelo de Kroll.

Frecuencia de pulsos

$$f = \frac{1}{T}$$

Caudal perdido

$$Q_{perdido} = Q_2 + Q_3$$

Eficiencia de la bomba

$$\eta = \frac{Q_{desc} \cdot h}{Q_{total} \cdot H}$$

Donde:

Q_{total} : es el caudal resultante de la suma del caudal descargado con el caudal perdido.

5.1.3 Relaciones complementarias empleadas en la implementación del modelo.

Factor de fricción de la tubería

El fluido es laminar si $R_e < 2000$, entonces:

$$f_t = \frac{64}{R_e}$$

Donde:

R_e : es el número de Reynolds.

El fluido es turbulento si $R_e > 2000$, entonces:

$$f_t = \frac{0.25}{[\log(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{R_e^{0.9}})]^2}$$

Donde:

D : es el diámetro interno de la tubería.

ε : es el factor de fricción.

Número de Reynolds

$$R_e = \frac{\rho \cdot D \cdot v}{\mu}$$

Donde:

ρ : es la densidad del agua.

μ : la viscosidad dinámica del agua.

D : el diámetro interno de la tubería de alimentación.

v : la velocidad del flujo en la tubería de alimentación.

Perdida de carga ajustada en la descarga

$$h_r = h_{r0} + K_{des} \frac{v_{des}^2}{2g}$$

Donde:

h_{r0} : es una pérdida de carga base en la descarga.

K_{des} : es un coeficiente de ajuste para la línea de descarga.

v_{des} : es la velocidad del agua en la tubería de descarga.

Área de la tubería de alimentación y descarga

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

5.2 ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL ARIETE HIDRÁULICO BAJO DIFERENTES CONFIGURACIONES DE OPERACIÓN

El análisis desarrollado en esta investigación se enfoca en la aplicación de un modelo matemático basado en el planteamiento de J. Kroll, el cual permite estudiar el comportamiento del ariete hidráulico ante diferentes configuraciones de operación. A diferencia de un enfoque netamente experimental, en este caso el análisis principal se realizó a partir de simulaciones teóricas programadas en Matlab, variando los parámetros de interés para determinar su efecto sobre el funcionamiento del sistema precisamente en la eficiencia y el caudal perdido.

El ariete hidráulico presenta un comportamiento altamente dependiente de las variables que intervienen en su configuración. Por esta razón, el modelo matemático se empleó para analizar la influencia de distintos parámetros sobre la eficiencia global, el caudal descargado, el caudal perdido.

Los parámetros seleccionados para el análisis teórico fueron:

- La constante elástica del resorte de la válvula de impulsión (K)
- La carrera de la válvula de impulsión
- El diámetro de impulsión
- El diámetro de descarga

A partir de estas variables, se evaluaron distintas configuraciones del sistema con el propósito de identificar su influencia en el fenómeno del golpe de ariete y en el desempeño general del ariete hidráulico.

El procedimiento seguido fue el siguiente:

1. Se seleccionó el parámetro que se deseaba analizar.
2. Se mantuvieron constantes los demás parámetros del sistema.
3. Para cada configuración definida, se establecieron diferentes valores de carrera de la válvula de impulsión.
4. Se ejecutó el modelo matemático para cada condición de análisis.

5. Se obtuvieron los valores teóricos de frecuencia, caudal descargado, caudal perdido y eficiencia.
6. Este procedimiento se repitió para todas las carreras de válvula consideradas en cada una de las configuraciones.
7. Finalmente, se compararon los resultados obtenidos de manera teórica con los resultados experimentales obtenidos para determinar la influencia de cada parámetro sobre el comportamiento del sistema.

Los resultados obtenidos mediante el modelo permitieron identificar tendencias de operación, con el propósito de evaluar la capacidad predictiva del modelo matemático propuesto.

5.3 VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO FRENTE A OTRAS INVESTIGACIONES

Con el fin de evaluar la validez del modelo matemático propuesto, los resultados obtenidos fueron contrastados con investigaciones previas reportadas en la literatura especializada sobre arietes hidráulicos. En particular, se tomó como referencia el trabajo “análisis del ariete hidráulico para diferentes configuraciones”, publicado en la revista UIS Ingenierías por Jabid Eduardo Quiroga-Méndez, Carlos Andrés Sierra-Gallo y Gerson Eduardo Biancha-Gutiérrez, en el volumen 12, número 2, páginas 29–34, año 2013. Este antecedente fue seleccionado por su afinidad temática con el presente estudio, ya que aborda el comportamiento del ariete hidráulico bajo distintas configuraciones de operación, permitiendo establecer un criterio de comparación con respecto a las tendencias obtenidas mediante el modelo desarrollado en esta investigación.

Los datos de entrada utilizados para la validación de este modelo matemático fueron los mismos considerados en el estudio previamente mencionado y se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2. Datos de entrada del modelo matemático

CÁLCULO EXPERIMENTAL		
Datos de entrada:		Unidades
Altura alimentación	1.2	(m)
Altura descarga	6.1	(m)
Hdes/Hali	5.083333333	
Volumen acumulador	1160	(ml)
Diámetro de válvula de impulsión	40	(mm)

Adicionalmente, para el proceso de validación se desarrollaron las siguientes actividades:

- Una vez planteado el modelo matemático, se tomaron como referencias curvas de tendencia reportadas en estudios previos sobre arietes hidráulicos, específicamente del trabajo mencionado anteriormente.
- A partir de los resultados obtenidos mediante la simulación del modelo en Matlab, se generaron curvas características del sistema.
- Se realizó una comparación gráfica entre las tendencias obtenidas teóricamente y las reportadas de manera experimental en la literatura.
- Esta comparación se efectuó para variables clave del sistema, tales como el caudal perdido, la eficiencia y el caudal descargado.
- El análisis se centró en verificar la similitud en el comportamiento de las curvas, evaluando la concordancia entre los resultados teóricos y experimentales como criterio de validación del modelo.

5.4 VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO FRENTE A DIFERENTES CONFIGURACIONES DEL PROTOTIPO PROPUESTO

Con el fin de evaluar el modelo matemático desarrollado, se llevó a cabo un proceso de validación teórica mediante el cual se estimó el comportamiento del ariete hidráulico. Para ello, se definieron múltiples configuraciones hidráulicas, variando parámetros clave del sistema y manteniendo constantes las demás condiciones de operación en cada caso, con el propósito de comprobar la capacidad del modelo para reproducir las tendencias observadas experimentalmente. Las configuraciones analizadas fueron las siguientes:

Variación de la constante del resorte

Se evaluó el comportamiento del sistema para valores de constante elástica de 50, 52, 54 y 56 N/m. Para cada uno de estos valores, se analizaron diferentes carreras de la 66 válvula de impulsión, manteniendo los demás parámetros constantes, con el fin de determinar su influencia sobre el caudal perdido y la eficiencia del sistema.

Variación del diámetro de la válvula de impulsión

Se estableció un diámetro de válvula de impulsión de 1 pulgada, evaluando su desempeño para cada uno de los valores de constante del resorte mencionados anteriormente. En esta configuración, se mantuvieron constantes las demás variables del sistema, permitiendo analizar el efecto del diámetro de paso sobre el comportamiento hidráulico de la bomba.

Variación del diámetro de la válvula de descarga:

Se analizó el efecto del diámetro de la válvula de descarga tipo bola, considerando un diámetro de 3/8 de pulgada (diámetro comercial). Este análisis se realizó para los cuatro valores de constante del resorte (50, 52, 54 y 56 N/m), manteniendo constantes las demás condiciones de entrada del sistema. El objetivo fue evaluar la influencia de este parámetro sobre la eficiencia y el caudal perdido, variables de mayor relevancia en el estudio.

De esta manera, la implementación de múltiples configuraciones permitió analizar la consistencia de las tendencias entre el modelo teórico y el comportamiento experimental, fortaleciendo así el proceso de validación del modelo matemático propuesto.

5.5 VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO PARA EL CASO DE ESTUDIO REAL

Con el propósito de evaluar la viabilidad del modelo matemático bajo condiciones reales de operación, se llevó a cabo su validación utilizando información correspondiente a un caso de estudio en la vereda corrales. Para ello, se consideraron tanto los parámetros definidos en el diseño de la bomba de ariete hidráulico como los datos medidos directamente en campo, lo que permitió representar de manera más precisa el comportamiento del sistema en un entorno real.

A partir de estos datos, se implementó el modelo matemático desarrollado, obteniendo variables de salida que describen el desempeño hidráulico de la bomba. Estos resultados sirvieron como base para contrastar las tendencias previamente identificadas en el prototipo experimental y, a su vez, para extender el análisis hacia condiciones reales de funcionamiento.

Parámetros de entrada considerados en campo:

- Altura de alimentación disponible
- Longitud y diámetro de la tubería de impulsión

- Diámetro de la válvula de impulsión
- Diámetro de la válvula de descarga
- Constante del resorte
- Carrera de la válvula de impulsión

Variables de salida obtenidas:

- Eficiencia del sistema
- Caudal descargado
- Caudal perdido
- Frecuencia de pulsos

Con base en los resultados obtenidos, se realizó un análisis de sensibilidad enfocado en este caso de estudio siguiendo la misma metodología empleada en el prototipo. Se evidenció que la carrera de la válvula de impulsión continúa siendo la variable con mayor incidencia sobre el desempeño del sistema, influyendo directamente en el caudal descargado, el caudal perdido y la eficiencia global de la bomba.

A partir de este análisis previamente hecho en el caso de estudio real, se evaluaron diferentes configuraciones operativas, con el fin de identificar la más conveniente desde el punto de vista hidráulico y se procedió a buscar la mejor configuración que nos permitiera obtener los siguientes criterios.

- Mayor eficiencia del sistema
- Menor caudal perdido

Finalmente, la validación del modelo matemático para el caso de estudio real permitió confirmar la coherencia entre el comportamiento teórico y experimental, así como establecer una base sólida para la selección de la mejor configuración de operación. Esto facilita la proyección de mejoras en el diseño de la bomba, orientadas a incrementar su eficiencia y tener un mejor aprovechamiento del recurso hídrico disponible.

5.6 METODOLOGÍA PARA LA TOMA DE DATOS FRENTE AL PROTOTIPO CONSTRUIDO

Con el propósito de obtener datos experimentales para validar el modelo matemático desarrollado, se realizó el montaje y operación del sistema de bombeo mediante ariete hidráulico bajo condiciones controladas. El procedimiento experimental se diseñó para garantizar la confiabilidad de los resultados, los cuales fueron posteriormente comparados con los valores teóricos.

- Se efectuó el montaje del sistema de bombeo mediante ariete hidráulico, de acuerdo con la configuración de una sola válvula de impulsión descrita previamente (Figura 2).
- Se abrió la válvula tipo bola de 3/4 ubicada en la tubería de alimentación, permitiendo el ingreso de agua al sistema.
- Inicialmente, la válvula de impulsión se mantuvo estática mientras el sistema se llenaba. Una vez estabilizada la presión, se accionó manualmente la válvula para iniciar la operación.
- Se esperó hasta que el sistema alcanzara un estado estable, evidenciado por un flujo continuo en la tubería de descarga.
- En estas condiciones, se registraron las variables constantes del ensayo, como la altura de alimentación H , la altura de descarga h y la longitud de las tuberías.
- Posteriormente, se midieron el caudal de suministro (q), el caudal de descarga y la frecuencia de pulsos de forma empírica, durante un intervalo fijo de tiempo (generalmente un minuto).
- Este procedimiento se repitió tres veces para los mismos datos de entrada (Tabla 3), con el fin de obtener información experimental que permitiera validar el modelo matemático y verificar la coherencia de su comportamiento.

Datos de entrada usados en la toma de datos experimentales:

Tabla 3. Datos de entrada del prototipo propuesto

CÁLCULO EXPERIMENTAL		
Datos de entrada:		Unidades
Altura alimentación	1.5	(m)
Altura descarga	2.75	(m)
Hdes/Hali	1.833333333	
Volumen acumulador	1000	(ml)
Longitud de tubería de alimentación	5	(m)
Longitud de tubería de descarga	4	(m)

5.7 CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL PROTOTIPO DE BOMBA DE ARIETE

5.7.1 Accesorios del sistema. El sistema hidráulico del prototipo de ariete está conformado por diversos accesorios que generan pérdidas menores en el flujo. Los accesorios hidráulicos empleados en el sistema experimental se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4. Accesorios hidráulicos usados en el montaje

Accesorio	Cantidad
Tee 3/4" - flujo recto por línea	2
Tee 3/4" - flujo por ramal	1
Válvula check tipo swing 3/4"	1
Válvula de bola 3/4" (línea de suministro)	1
Válvula de bola 1/2" (línea de descarga)	1
Codo 90° roscado, radio largo	1
Niple de 5 cm	6
Reducción 3/4" a 1/2"	1
Recipiente acumulador (1 Lt)	1

5.7.2 Altura de alimentación. El tanque de alimentación cumple la función de representar la fuente natural de agua encargada de suministrar el caudal al ariete hidráulico de manera continua. El tanque utilizado en el montaje experimental tiene una capacidad de 40 litros.

Figura 16. Tanque de alimentación



5.7.3 Tubería de alimentación. Las tuberías del sistema de alimentación tienen la función de conducir el fluido desde el tanque de suministro hasta el ariete hidráulico, constituyendo uno de los elementos principales de la instalación hidráulica. En el montaje experimental se utilizaron dos tramos de tubería de PVC de 3/4", conectados entre sí mediante una unión lisa. Uno de los tramos posee una longitud de 3 m y el otro de 2 m, formando la línea de alimentación encargada de transportar el agua hacia el ariete y permitir que el fluido alcance una altura aproximada de 2.75 m antes de ingresar al sistema. Asimismo, para realizar la conexión con el tanque de almacenamiento de 80 litros, se empleó un adaptador de 3/4", el cual permite acoplar la tubería de alimentación al punto de salida del tanque.

5.7.4 Caracterización de la tubería. La caracterización de la tubería utilizada en el sistema es un aspecto fundamental para el análisis hidráulico del ariete, ya que las dimensiones geométricas de la conducción influyen directamente en el comportamiento del flujo y en las pérdidas de energía presentes en el sistema.

VARIABLES como el diámetro interno, el espesor de la pared y el área de flujo definen la velocidad del fluido, el número de Reynolds y el desarrollo de las pérdidas por fricción a lo largo de la tubería.

Tabla 5. Dimensiones geométricas de tuberías Schedule 40

TABLA F.1 Schedule 40										
Tamaño nominal de tubería		Diámetro externo		Espesor de la pared		Diámetro interior			Área de flujo	
NPS (in)	DN (mm)	(in)	(mm)	(in)	(mm)	(in)	(ft)	(mm)	(ft ²)	(m ²)
1/8	6	0.405	10.3	0.068	1.7	0.269	0.0224	6.8	0.000394	3.6x10 ⁻⁵
1/4	8	0.540	13.7	0.088	2.2	0.364	0.0303	9.2	0.000723	6.7x10 ⁻⁵
3/8	10	0.675	17.1	0.091	2.3	0.493	0.0411	12.5	0.001330	1.2x10 ⁻⁴
1/2	15	0.840	21.3	0.109	2.8	0.622	0.0518	15.8	0.002110	1.9x10 ⁻⁴
3/4	20	1.050	26.7	0.113	2.9	0.824	0.0687	20.9	0.003700	3.4x10 ⁻⁴

Fuente: MOTT, Robert L.; UNTENER, Joseph A. Applied Fluid Mechanics. 7 ed. Pearson Education, 2015.

El factor de fricción utilizado en el análisis hidráulico fue tomado de valores tabulados reportados en la literatura especializada. En la (Tabla 6) se muestran valores característicos del factor de fricción f_t en función del diámetro nominal de la tubería, los cuales se utilizaron para calcular las pérdidas por fricción en el sistema.

Tabla 6. Factor de fricción para diámetros nominales de la tubería

Tamaño nominal de tubería		Factor de fricción, f_t	Tamaño nominal de tubería		Factor de fricción, f_t
U.S. (in)	Metric (mm)		U.S. (in)	Metric (mm)	
1/2	DN 15	0.026	3, 3 1/2	DN 80, DN 90	0.017
3/4	DN 20	0.024	4	DN 100	0.016
1	DN 25	0.022	5, 6	DN 125, DN 150	0.015
1 1/4	DN 32	0.021	8	DN 200	0.014
1 1/2	DN 40	0.020	10–14	DN 250 to DN 350	0.013
2	DN 50	0.019	16–22	DN 400 to DN 550	0.012
2 1/2	DN 65	0.018	24–36	DN 600 to DN 900	0.011

Fuente: MOTT, Robert L.; UNTENER, Joseph A. *Applied Fluid Mechanics*. 7 ed. Pearson Education, 2015.

En el cálculo de las pérdidas por fricción se tuvo en cuenta la rugosidad de la tubería. Los valores característicos de rugosidad para diferentes materiales se presentan en la (Tabla 7).

Tabla 7. Rugosidad absoluta para diferentes materiales

Material	Rugosidad ϵ (m)	Rugosidad ϵ (ft)
Glass	Smooth	Smooth
Plastic	3.0E-07	1.0E-06
Drawn tubing; copper, brass, steel	1.5E-06	5.0E-06
Steel, commercial or welded	4.6E-05	1.5E-04
Galvanized iron	1.5E-04	5.0E-04
Ductile iron—coated	1.2E-04	4.0E-04
Ductile iron—uncoated	2.4E-04	8.0E-04
Concrete, well made	1.2E-04	4.0E-04
Riveted steel	1.8E-03	6.0E-03

Fuente: MOTT, Robert L.; UNTENER, Joseph A. *Applied Fluid Mechanics*. 7 ed. Pearson Education, 2015.

5.7.5 Tubería de descarga. En el montaje experimental se emplearon dos tramos de tubería de PVC de 1/2" que conforman la línea de descarga del sistema. Estos tramos, con longitudes de 3 m y 1 m, respectivamente, fueron unidos mediante una unión lisa, formando la conducción encargada de transportar el agua impulsada por el ariete hidráulico. A través de esta línea, el fluido es conducido hasta alcanzar una altura aproximada de 2.75 m. Adicionalmente, se instaló un acople de 1/2" para realizar la conexión con la válvula de descarga tipo bola o llave de paso, permitiendo así el control del flujo en la salida del sistema.

Figura 17. Montaje tubería de descarga



5.7.6 Manómetros. En el sistema experimental se instalaron manómetros en las líneas de suministro y de descarga, con el propósito de medir las presiones presentes durante el funcionamiento del ariete hidráulico. Los instrumentos utilizados corresponden a manómetros marca HINTE, serie MU, con un rango de medición aproximado de 0 a 2.06 bar (equivalente a 0 a 30 psi).

Figura 18. Manómetro HINTF



5.7.7 Calibración de caudalímetro (Arduino uno). Se utilizó un caudalímetro de turbina modelo YF-S201B G1/2", el cual genera una señal de pulsos proporcional al caudal. El sensor se instaló en la tubería de alimentación, adaptándolo a una conducción de 3/4" mediante un reductor para su correcta integración al sistema. Posteriormente, el sensor se calibró mediante una placa Arduino Nano, permitiendo medir con mayor precisión el caudal a partir de la frecuencia de pulsos. El caudalímetro se instaló en la tubería de descarga para registrar el caudal impulsado y compararlo con el de entrada. Se realizaron tres mediciones para mejorar la precisión de los resultados.

Figura 19. Caudalímetro de turbina (YF-S201B G1/2)



5.7.8 Válvula de impulsión o de pie. Se empleó una válvula de impulsión en bronce de 3/4", conformada por un vástago, un obturador y un resorte encargado de regular su apertura y cierre. Este conjunto permite el accionamiento dinámico de la válvula durante la operación del ariete hidráulico, favoreciendo la interrupción súbita del flujo necesaria para la generación del golpe de ariete. Para el sistema analizado, la válvula fue equipada con un resorte de constante aproximada de 50 N/m.

Figura 20. Válvula de impulsión de bronce



5.7.9 Resorte válvula de impulsión. En la figura 21 se presenta el resorte utilizado en la válvula de impulsión del ariete hidráulico. Este elemento cumple un papel fundamental en el funcionamiento del sistema, ya que controla el cierre de la válvula y, por ende, influye directamente en la generación del golpe de ariete.

A continuación, se presentan los datos característicos del resorte empleado, incluyendo sus propiedades mecánicas y dimensiones principales, los cuales fueron considerados para el desarrollo del modelo matemático y el análisis del comportamiento del sistema.

Figura 21. Resorte válvula de impulsión



A continuación, se presentan los datos característicos del resorte empleado, incluyendo sus propiedades mecánicas y dimensiones principales, los cuales fueron considerados para el desarrollo del modelo matemático y el análisis del comportamiento del sistema.

Tabla 8. Propiedades del resorte

Descripción	Valor
Material	Acero inoxidable 302
Módulo de rigidez adoptado	$G = 77 \text{ GPa} = 77\,000 \text{ N/mm}^2$
Tipo de resorte	Helicoidal de compresión, alambre redondo
Constante del resorte	50 N/m
Número de espiras	8
Diametro interior	6.50 mm
Largo	19.5 mm

5.7.10 Cuerpo de bomba de ariete. En esta sección se presenta el montaje del cuerpo del ariete hidráulico utilizado en el desarrollo experimental. Este sistema está conformado por los principales elementos que permiten el funcionamiento del ariete, tales como la válvula de impulsión, la válvula check, el recipiente acumulador y los instrumentos de medición mencionados anteriormente (Tabla 4). La correcta disposición de estos componentes es fundamental para garantizar el adecuado comportamiento del sistema y la generación del fenómeno de golpe de ariete.

Figura 22. Montaje cuerpo del ariete hidráulico



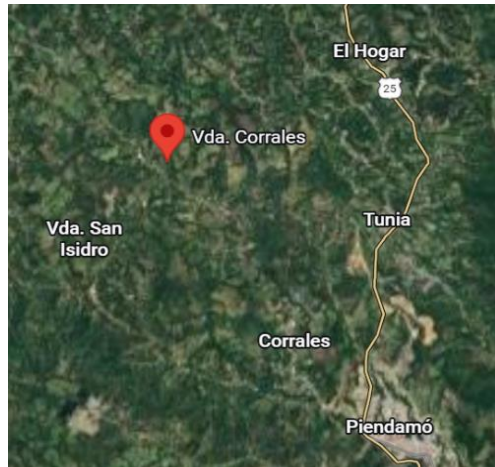
5.8 METODOLOGÍA PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS PARA EL CASO DE ESTUDIO REAL

Para la proyección del sistema en condiciones reales, se definió como caso de estudio el municipio de Piendamó, Cauca. La selección de este sitio permitió representar un escenario típico de abastecimiento de agua en zonas rurales con limitaciones de acceso a sistemas convencionales de bombeo.

Inicialmente, se definieron las condiciones de operación del sistema, estableciendo una altura de elevación de 30 m como parámetro de diseño. Para la recolección de información, se utilizaron imágenes y datos de un prototipo real de bomba de ariete hidráulico, diseñado por un fabricante independiente (Arietes Hidráulicos Javi), los cuales fueron empleados como variables de entrada en el modelo matemático, con el fin de analizar y mejorar la eficiencia del sistema, reduciendo el caudal perdido y optimizando su rendimiento hidráulico.

5.8.1 Ubicación geográfica. A continuación, se presenta la ubicación geográfica exacta del caso de estudio, correspondiente a la vereda Correales, ubicada en el municipio de Piendamó, en cercanías de Popayán. La identificación de esta localización permite contextualizar las condiciones físicas y ambientales en las cuales se proyectó la implementación del sistema de bombeo por ariete hidráulico,

Figura 23. Ubicación geográfica



Fuente: Adaptado de Google maps, 2026.

5.8.2 Reservorio de alimentación. El sistema fue planteado a partir de la captación de agua desde un reservorio natural, desde el cual el fluido es conducido por gravedad hacia la bomba de ariete para su correcto funcionamiento. Este tanque actúa como fuente de alimentación garantizando un flujo continuo y condiciones de entrada estables.

Figura 24. Reservorio de alimentación



Fuente: [Fotografía] Suministrada por arietes hidráulicos Javi, fabricante de bombas hidráulicas

5.8.3 Tanque de descarga. Se estableció un tanque de almacenamiento ubicado en la vivienda tipo casa-finca, correspondiente al punto final de abastecimiento del sistema. Este tanque presenta una altura de instalación de 5 metros respecto al nivel de referencia local; sin embargo, al considerar el sistema completo impulsado por la bomba de ariete, se alcanza una altura total de elevación de 32 metros, cumpliendo con el requerimiento de diseño previamente establecido.

El tanque tiene una capacidad de 2000 litros y está fabricado en PVC, material seleccionado por su resistencia, disponibilidad y adecuación para sistemas de almacenamiento de agua en zonas rurales. Su ubicación en el punto de consumo final permite garantizar el suministro por gravedad hacia la vivienda, optimizando la distribución del recurso hídrico.

Figura 25. Tanque de descarga



Fuente: [Fotografía] Suministrada por arietes hidráulicos Javi, fabricante de bombas hidráulicas

5.8.4 Resorte válvula de impulsión. En la figura 26 se presenta el resorte utilizado en la válvula de impulsión del ariete hidráulico, componente fundamental debido a su influencia en la dinámica de apertura y cierre de la válvula. Este elemento permite el cierre rápido tras el paso del flujo, generando el incremento de presión característico del golpe de ariete, necesario para impulsar el agua a mayor altura. Su comportamiento incide directamente en la estabilidad y eficiencia del sistema.

Para el diseño, se empleó un resorte con una rigidez de 420 N/m, seleccionado para lograr un equilibrio adecuado entre la fuerza de cierre y la respuesta dinámica del mecanismo. Una rigidez apropiada evita cierres ineficientes o excesivos que afecten el rendimiento hidráulico y la durabilidad del sistema, garantizando así una operación estable y continua de la bomba.

Figura 26. Resorte válvula de impulsión



Fuente: [Fotografía] Suministrada por arietes hidráulicos Javi, fabricante de bombas hidráulicas

A continuación, se presentan las principales características mecánicas y geométricas del resorte, consideradas en el modelo matemático del sistema.

Tabla 9. Características del resorte

Parámetro	Valor	Unidades
Longitud del resorte	6	(cm)
Número de espiras del resorte	12	
Calibre del material del resorte	1.2	(mm)
Diámetro del resorte	1.82	(cm)
Constante del resorte	420	(N/m)

5.8.5 Recipiente acumulador. El recipiente acumulador empleado en el sistema fue diseñado con una geometría cilíndrica en acero galvanizado, seleccionado por su resistencia y durabilidad. Presenta una altura de 43 cm y un perímetro de 53.5 cm, lo que corresponde a un volumen aproximado de 9.8 litros. Estas características permiten garantizar una adecuada acumulación y estabilización del flujo en la bomba de ariete hidráulico.

Figura 27. Recipiente acumulador



Fuente: [Fotografía] Suministrada por arietes hidráulicos Javi, fabricante de bombas hidráulicas

5.8.6 Cuerpo del ariete. En esta sección se presenta el cuerpo del ariete hidráulico diseñado para el sistema propuesto, el cual integra los elementos principales que permiten su funcionamiento. Este conjunto garantiza la adecuada interacción entre la válvula de impulsión, la válvula check y el recipiente acumulador, permitiendo el desarrollo continuo del ciclo hidráulico. La disposición de estos componentes facilita el control del flujo y la generación de las condiciones necesarias para el adecuado desempeño del sistema.

La configuración del cuerpo del ariete resulta clave en la eficiencia del proceso, debido a que incide directamente en la transmisión de presión y en la generación del golpe de ariete. Una configuración adecuada permite minimizar pérdidas de energía, mejorar la estabilidad operativa y mejorar el aprovechamiento del caudal disponible, asegurando así un funcionamiento eficiente y confiable del sistema hidráulico.

Figura 28. Cuerpo del ariete



Fuente: [Fotografía] suministrada por arietes hidráulicos Javi, fabricante de bombas hidráulicas

El ariete hidráulico está compuesto por diversos accesorios que intervienen en el flujo y generan pérdidas menores. A continuación, se presentan los accesorios hidráulicos utilizados en la configuración del sistema.

Tabla 10. Datos de accesorios hidráulicos

Accesorio	Diametro	Unidades
Cheque antirretorno horizontal	0.75	(in)
Niple	1.5	(in)
Unión o acople roscado	1.5	(in)

Finalmente, los datos de entrada usados para la proyección del caso real en el modelo matemático y que se cumpliera una altura de descarga de 30 metros son los presentados en la tabla 11.

Tabla 11. Datos de entrada para la proyección del sistema

Parámetro	Valor	Unidades
Altura de alimentación	6.20	(m)
Altura de descarga	32	(m)
Longitud tubería impulsión	11	(m)
Diámetro de tubería impulsión	1.5	(in)
Longitud tubería descarga	100	(m)
Diámetro de tubería de descarga	0.75	(in)
Diámetro válvula de impulsión	2.5	(in)
Material de tubería	Acero galvanizado	
Caudal real descargado	4.16	(L/min)
Carrera de la válvula	2.2	(cm)
Frecuencia de pulsos	60	golpes/min
Volumen del acumulador	9.8	L

5.9 APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MODELO DEL ARIETE HIDRAULICO

Para identificar los parámetros que más afectan el comportamiento de la bomba de ariete, especialmente en términos de eficiencia y desperdicio de agua, se realiza un procedimiento matemático llamado análisis de sensibilidad. Este análisis permite observar cómo cambian los resultados del sistema cuando se modifican ciertos parámetros del modelo y, así, determinar cuáles variables tienen mayor influencia en su funcionamiento.

En este trabajo se consideran principalmente la constante del resorte, la carrera de la válvula de impulsión y los diámetros de impulsión y descarga, ya que estos parámetros pueden modificar el caudal descargado, el caudal perdido y la eficiencia del sistema. Por esta razón se aplicó un análisis de sensibilidad para evaluar la influencia relativa de cada uno.

Para realizar este estudio se utilizaron cuatro métodos principales de análisis de sensibilidad, los cuales permiten analizar cómo varían las variables de salida cuando se modifica un parámetro a la vez. De esta manera se puede identificar cuáles parámetros generan los cambios más significativos en el sistema y, entonces, establecer qué variables son más importantes para mejorar el rendimiento de la bomba.

5.9.1 Método Once-at-a-Time (OAT). Consiste en variar un solo parámetro a la vez, mientras los demás se mantienen constantes. Así se observa directamente cuánto cambia la salida del sistema cuando se modifica esa variable.

5.9.2 Sensibilidad diferencial (Differential Sensitivity). Este método compara el porcentaje de cambio en la salida con el porcentaje de cambio en el parámetro de entrada. De esta forma se mide qué tan fuerte responde el sistema ante pequeñas variaciones de cada parámetro.

$$\varphi_i = \frac{\% \Delta Y}{\% \Delta X_i}$$

5.9.3 Índice de sensibilidad (Sensitivity Index – SI). Evalúa la influencia de un parámetro usando el rango total de resultados, es decir, comparando el valor máximo y el mínimo de la salida cuando se varía ese parámetro.

$$SI_i = \frac{Y_{max} - Y_{min}}{Y_{min}}$$

5.9.4 Factor de importancia (Importance Factor – IF). Determina la influencia de un parámetro analizando la varianza de la salida, es decir, qué tanto se dispersan los resultados cuando ese parámetro cambia. Cuanto mayor es la varianza, mayor es la influencia del parámetro.

$$IF_i = \sigma^2(Y(X_i))$$

6. RESULTADOS

6.1 VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO FRENTE A OTRAS INVESTIGACIONES

La validación del modelo matemático se llevó a cabo mediante la comparación de sus resultados con datos experimentales reportados en la literatura, específicamente en el trabajo de Quiroga-Méndez, Sierra-Gallo y Biancha-Gutiérrez (2013). Para ello, se consideraron cuatro casos de estudio bajo condiciones operativas similares, variando únicamente la constante del resorte de la válvula de impulsión a diferentes carreras de válvula de impulsión, mientras que los demás parámetros del sistema se mantuvieron constantes como se reportaban en la investigación anteriormente mencionada. A partir de estas condiciones, se evaluaron las variables de respuesta del modelo, permitiendo contrastar el comportamiento teórico con los resultados experimentales y así verificar la capacidad del modelo para reproducir adecuadamente la dinámica hidráulica de la bomba de ariete.

Caso de validación 1:

Para el primer caso de estudio, correspondiente a un resorte de rigidez $k = 414$ N/m y manteniendo constantes las demás variables de operación del sistema, se obtuvieron las variables de respuesta que permiten caracterizar el comportamiento hidráulico de la bomba de ariete. Estas magnitudes sirven como base para el análisis del sistema y, posteriormente, para su representación gráfica del Caudal perdido y la eficiencia que es el indicio primordial del desarrollo de este proyecto.

Datos de entrada:

- Constante del resorte: 414 N/m
- D válvula impulso: 40 mm
- D válvula descarga: 40 mm
- H alimentación: 1.2 m
- H descarga: 6.1 m
- Carrera de válvula (s): [1.8 a 3.8] mm

Resorte 1: 414 N/m

Se obtuvieron los siguientes resultados para cada una de las variables de entrada:

Tabla 12. Resultados obtenidos con el resorte 414 N/m- Quiroga-Méndez et al. (2013)

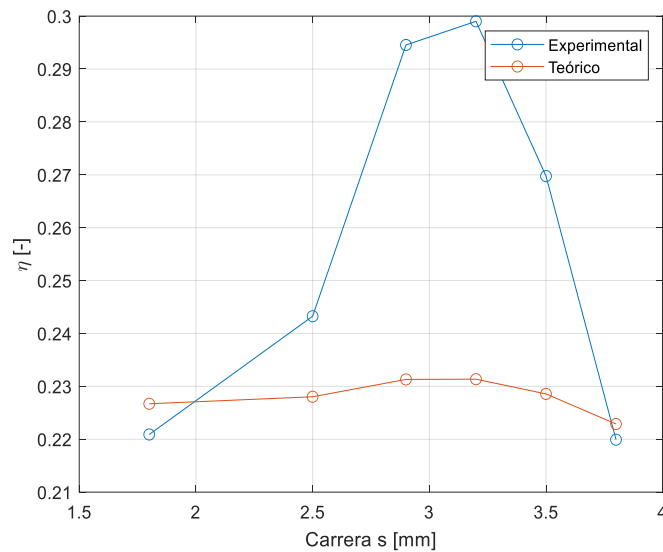
RESORTE 1: 414 N/m					
CARRERA DE VALVULA [mm]	FRECUENCIA [PULSOS/min]	CAUDAL PERDIDO [mlts/min]	CAUDAL DESCARGADO [mlts/min]	Qdes/Qtot	η TOTAL
1.8	128	18600	845	0.0435	0.221
2.5	120	19300	970	0.0479	0.243
2.9	106	23900	1470	0.0579	0.295
3.2	96	26400	1650	0.0588	0.299
3.5	92	29800	1670	0.0531	0.270
3.8	85	38700	1750	0.0433	0.220

Tabla 13. Resultados obtenidos con el resorte 414 N/m- Modelo matemático

RESORTE 1: 414 N/m						
CARRERA DE VALVULA [mm]	FRECUENCIA [PULSOS/min]	CAUDAL PERDIDO [L/s]	CAUDAL DESCARGADO [L/s]	Qtot	Qdes/Qtot	η TOTAL
1.8	83.88	0.293	0.01368	0.30668	0.0446	0.227
2.5	65.33	0.39997	0.01879	0.41876	0.0449	0.228
2.9	59.46	0.4753	0.02268	0.49798	0.0455	0.232
3.2	56.26	0.547	0.02611	0.57311	0.0456	0.232
3.5	53.82	0.6369	0.03004	0.66694	0.0450	0.229
3.8	51.96	0.7507	0.0345	0.7852	0.0439	0.223

Seguidamente, se muestra la comparación entre los datos experimentales y los resultados teóricos obtenidos a partir del modelo matemático de la bomba de ariete, en función de la carrera de la válvula de impulsión.

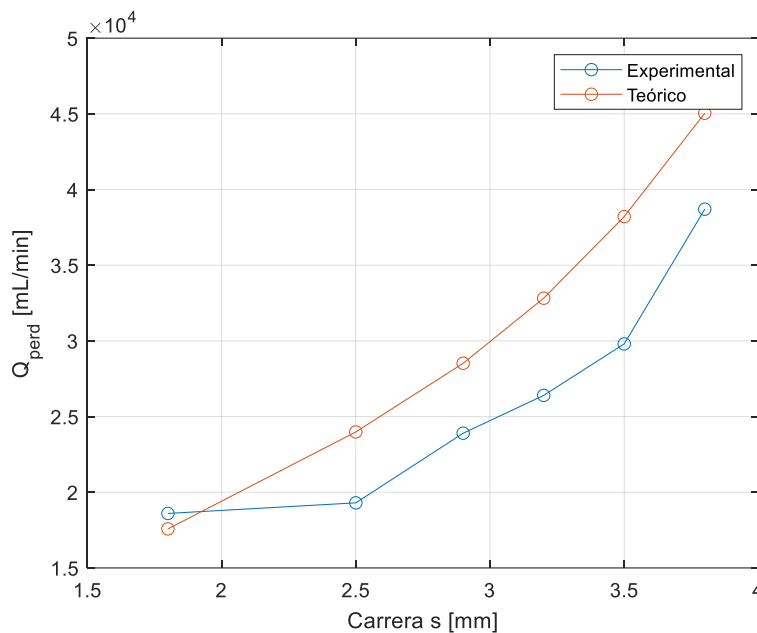
Figura 29. Experimentales de Quiroga-Méndez et al. (2013) y teóricos (modelo matemático) respecto a eficiencia total (414 N/m)



La figura 29 muestra que tanto los resultados experimentales como los teóricos presentan una tendencia similar de tipo parabólico en función de la carrera de la válvula, evidenciando un incremento inicial hasta alcanzar un valor máximo cercano a 3.1 mm y una posterior disminución. Este comportamiento sugiere la existencia de una condición óptima de operación del sistema. No obstante, el modelo teórico presenta una variación más suave y valores inferiores en comparación con los datos experimentales, lo que indica que, aunque reproduce adecuadamente la tendencia general del fenómeno, no logra capturar completamente la magnitud del comportamiento real.

Posteriormente con el fin de evaluar el desempeño del modelo matemático propuesto, se realizó la comparación entre los valores teóricos y los datos experimentales del caudal descargado en función de la carrera de la válvula de impulsión.

Figura 30. Experimentales de Quiroga-Méndez et al. (2013) y teóricos (modelo matemático) respecto al caudal perdido (414 N/m)



Se muestra que tanto los resultados experimentales como los teóricos presentan una tendencia creciente con respecto a la carrera de la válvula, evidenciando una relación directa entre esta variable y el caudal descargado. Sin embargo, el modelo teórico predice valores superiores en todo el rango analizado, lo que indica una sobreestimación del caudal en comparación con los datos experimentales. A pesar de esta diferencia, ambas curvas mantienen una tendencia similar, lo que sugiere que el modelo logra describir adecuadamente el comportamiento general del sistema, aunque no reproduce con exactitud la magnitud real del fenómeno.

Caso de validación 2:

Para el segundo caso de estudio, se evaluó el comportamiento de la bomba de ariete empleando un resorte de rigidez $k = 498$ N/m, manteniendo constantes las demás variables de operación del sistema. A partir del modelo matemático planteado, se obtuvieron las variables de respuesta necesarias para comparar este nuevo resorte con el caso anterior y analizar su influencia sobre el desempeño hidráulico del sistema,

Datos de entrada:

- Constante del resorte: 498 N/m
- D válvula impulso: 40 mm
- D válvula descarga: 40 mm
- H alimentación: 1.2 m
- H descarga: 6.1 m
- Carrera de válvula (s): [2 a 3.2] mm

Resorte 2: 498 N/m

Se determinaron los siguientes resultados para cada una de las variables de entrada.

Tabla 14. Resultados obtenidos con el resorte 498 N/m- Quiroga-Méndez et al. (2013)

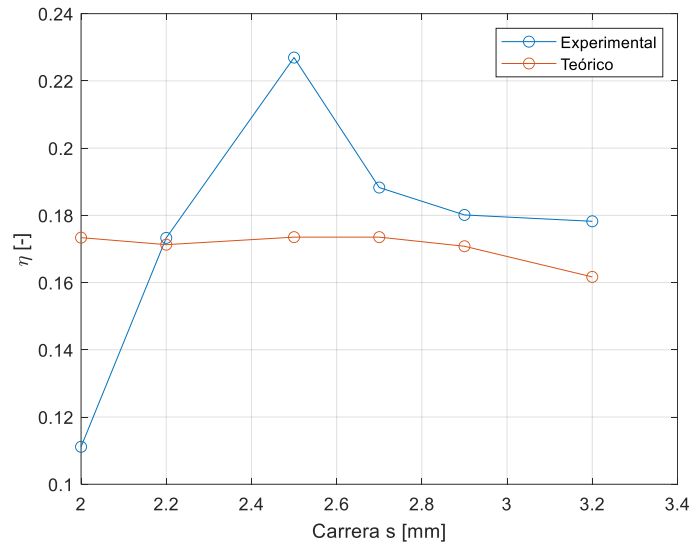
RESORTE 2: 498 N/m					
CARRERA DE VALVULA [mm]	FRECUENCIA [PULSOS/min]	CAUDAL PERDIDO [mlts/min]	CAUDAL DESCARGADO [mlts/min]	Qdes/Qtot	η TOTAL
2	130	17000	380	0.0219	0.111
2.2	113	20400	720	0.0341	0.173
2.5	98	21400	1000	0.0446	0.227
2.7	86	27300	1050	0.0370	0.188
2.9	80	29400	1080	0.0354	0.180
3.2	78	32200	1170	0.0351	0.178

Tabla 15. Resultados obtenidos con el resorte 498 N/m- Modelo matemático

RESORTE 2: 498 N/m					
CARRERA DE VALVULA [mm]	FRECUENCIA [PULSOS/min]	CAUDAL PERDIDO [L/s]	CAUDAL DESCARGADO [L/s]	Qdes/Qtot	η TOTAL
2	85.80133946	0.2362	0.0034	0.0142	0.173
2.2	75.26981396	0.280615	0.00978	0.0337	0.171
2.5	65.88803839	0.3579	0.01264	0.0341	0.174
2.7	61.94981084	0.42577	0.01504	0.0341	0.174
2.9	59.14714604	0.5143	0.017882	0.0336	0.171
3.2	56.38520256	0.7021	0.023066	0.0318	0.162

La figura 31 presenta la comparación entre los valores experimentales y los obtenidos mediante el modelo teórico para una bomba de ariete, considerando un resorte con constante de 498 N/m

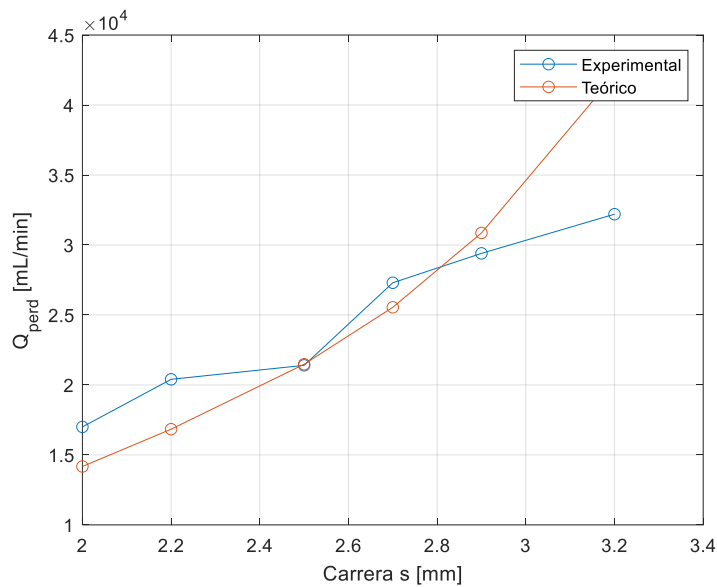
Figura 31. Experimentales de Quiroga-Méndez et al. (2013) y teóricos (modelo matemático) respecto a eficiencia total (498 N/m)



Ambos resultados muestran una tendencia parabólica con un punto óptimo alrededor de 2.5 mm. El modelo teórico predice adecuadamente la tendencia general, aunque presenta diferencias respecto a los valores experimentales, evidenciando la influencia de pérdidas y efectos no ideales no considerados en el modelo.

En la figura 32 se analiza la relación entre la carrera de la válvula y el caudal de descarga en una bomba de ariete para un resorte de 498 N/m, comparando los resultados obtenidos experimentalmente con los estimados mediante el modelo matemático. Este análisis permite examinar la capacidad predictiva del modelo frente al comportamiento real del sistema.

Figura 32. Experimentales de Quiroga-Méndez et al. (2013) y teóricos (modelo matemático) respecto al caudal perdido (498 N/m)



Los resultados evidencian que el incremento de la carrera de la válvula genera un aumento progresivo del caudal tanto en el modelo teórico como en los datos experimentales, lo que confirma una relación directa entre estas variables. No obstante, a medida que la carrera aumenta, se observa una mayor discrepancia entre ambos enfoques, siendo el modelo teórico más optimista. Esta diferencia sugiere que el modelo no considera completamente fenómenos inherentes al sistema real, tales como pérdidas hidráulicas adicionales, retardos en la respuesta de las válvulas y efectos dinámicos del flujo, lo que limita su precisión en condiciones de operación más exigentes.

Caso de validación 3:

Así mismo, para el tercer caso de estudio se analizó la respuesta de la bomba de ariete al considerar un resorte con mayor rigidez, lo que permitió observar el efecto de la constante del resorte sobre el comportamiento hidráulico de la bomba.

Datos de entrada:

- Constante del resorte: 538 N/m
- D válvula impulso: 40 mm
- D válvula descarga: 40 mm
- H alimentación: 1.2 m

- H descarga: 6.1 m
- Carrera de válvula (s): [1.9 a 2.9] mm

Resorte 3: 538 N/m

Se obtuvieron los siguientes resultados para cada una de las variables de salida:

Tabla 16. Resultados obtenidos con el resorte 538 N/m- Quiroga-Méndez et al. (2013)

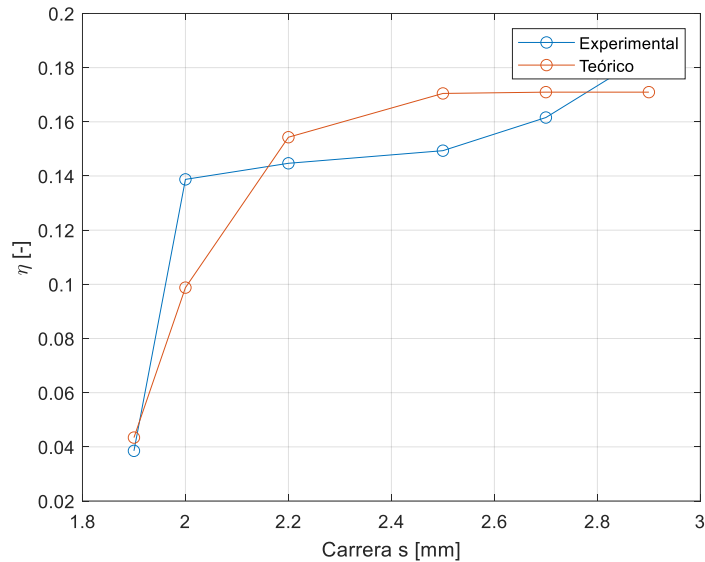
RESORTE 3: 538 N/m					
CARRERA DE VALVULA [mm]	FRECUENCIA [PULSOS/min]	CAUDAL PERDIDO [mlts/min]	CAUDAL DESCARGADO [mlts/min]	Qdes/Qtot	η TOTAL
1.9	141	14400	110	0.0076	0.039
2	110	19600	550	0.0273	0.139
2.2	94	25600	750	0.0285	0.145
2.5	92	26100	790	0.0294	0.149
2.7	85	26500	870	0.0318	0.162
2.9	83	27000	1020	0.0364	0.185

Tabla 17. Resultados obtenidos con el resorte 538 N/m- Modelo matemático

RESORTE 3: 538 N/m					
CARRERA DE VALVULA [mm]	FRECUENCIA [PULSOS/min]	CAUDAL PERDIDO [L/s]	CAUDAL DESCARGADO [L/s]	Qdes/Qtot	η TOTAL
1.9	171.2879202	0.2481	0.002075	0.0083	0.043
2	159.2116798	0.2652	0.00525	0.0194	0.099
2.2	134.7878906	0.319	0.0098	0.0298	0.154
2.5	108.2472346	0.39475	0.013	0.0319	0.170
2.7	95.44394246	0.44	0.015	0.0330	0.171
2.9	85.20212205	0.4826	0.016	0.0321	0.17095503

La figura 33 presenta la evolución del rendimiento de la bomba de ariete en función de la carrera de la válvula para un resorte con constante de 538 N/m, permitiendo analizar el efecto de la rigidez del resorte sobre el comportamiento del sistema y la concordancia entre el modelo teórico y los datos experimentales.

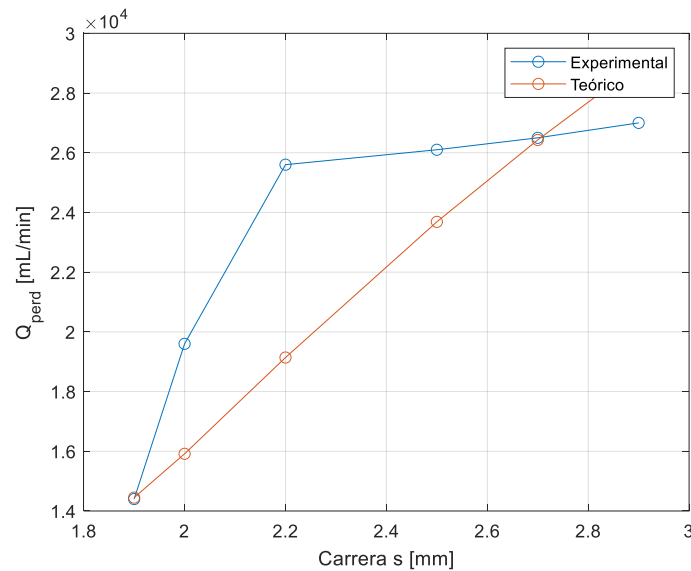
Figura 33. Experimentales de Quiroga-Méndez et al. (2013) y teóricos (modelo matemático) respecto a eficiencia total (538 N/m)



Para el resorte de 538 N/m se observa que el rendimiento aumenta rápidamente al inicio y luego tiende a mantenerse casi constante a medida que crece la carrera, sin presentar un máximo claro en el rango analizado. El modelo teórico sigue bien esta tendencia, aunque en general da valores un poco más altos que los experimentales. Esto muestra que, aunque el modelo representa el comportamiento global del sistema, todavía hay diferencias debido a pérdidas y efectos reales que no se están considerando.

Ahora, para un resorte de 538 N/m, se muestra el comportamiento del caudal perdido en función de la carrera de la válvula, comparando los resultados experimentales con los obtenidos mediante el modelo teórico, con el fin de analizar las diferencias en la estimación de las pérdidas del sistema.

Figura 34. Experimentales de Quiroga-Méndez et al. (2013) y teóricos (modelo matemático) respecto a caudal perdido (538 N/m)



Para este caso, el caudal aumenta con la carrera, aunque en los datos experimentales el crecimiento se vuelve más suave a partir de cierto punto, mostrando una tendencia a estabilizarse. El modelo teórico también presenta un incremento continuo, pero con una pendiente más marcada en las últimas carreras. En general, el modelo sigue la tendencia, aunque no logra reproducir completamente el cambio de comportamiento observado experimentalmente, lo que sugiere la influencia de efectos reales no considerados.

Caso de validación 4:

Por último, se evaluó un resorte de 593 N/m con el fin de verificar de forma más completa el comportamiento del modelo matemático propuesto.

Datos de entrada:

- Constante del resorte: 593 N/m
- D válvula impulso: 40 mm
- D válvula descarga: 40 mm
- H alimentación: 1.2 m
- H descarga: 6.1 m
- Carrera de válvula (s): [1.8 a 2.2] mm

Para el caso de estudio 4 se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 18. Resultados obtenidos con el resorte 593 N/m- Quiroga-Méndez et al. (2013)

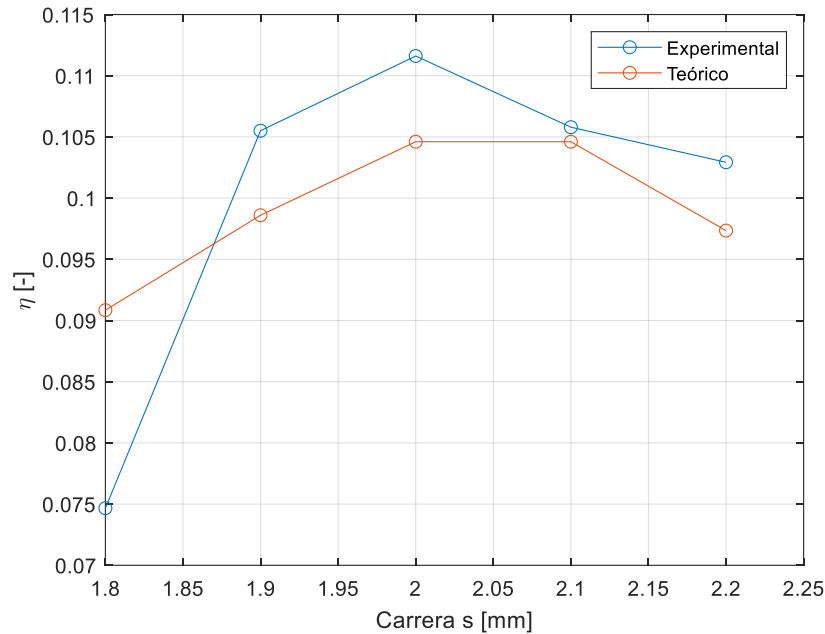
RESORTE 4: 593 N/m					
CARRERA DE VALVULA [mm]	FRECUENCIA [PULSOS/min]	CAUDAL PERDIDO [mlts/min]	CAUDAL DESCARGADO [mlts/min]	Qdes/Qtot	η TOTAL
1.8	128	16100	240	0.0147	0.075
1.9	110	18400	390	0.0208	0.106
2	100	19600	440	0.0220	0.112
2.1	84	28700	610	0.0208	0.106
2.2	78	30000	620	0.0202	0.103

Tabla 19. Resultados obtenidos con el resorte 593 N/m- Modelo matemático

RESORTE 4: 593 N/m					
CARRERA DE VALVULA [mm]	FRECUENCIA [PULSOS/min]	CAUDAL PERDIDO [L/s]	CAUDAL DESCARGADO [L/s]	Qdes/Qtot	η TOTAL
1.8	109.5322513	0.2491	0.00455	0.0179	0.091
1.9	98.59767007	0.29	0.00573	0.0194	0.099
2	91.72458458	0.3417	0.00716	0.0205	0.104
2.1	87.12383246	0.4239	0.00885	0.0205	0.104
2.2	83.9358442	0.5548	0.01084	0.0192	0.097

En este análisis se estudia el comportamiento de un resorte con constante elástica de 598 N/m, comparando los resultados obtenidos experimentalmente con un modelo teórico. La variable evaluada es la eficiencia (η) en función de la carrera del sistema (s, en mm). El objetivo es identificar la relación entre estas variables y verificar si el modelo teórico representa adecuadamente el comportamiento real del sistema.

Figura 35. Experimentales de Quiroga-Méndez et al. (2013) y teóricos (modelo matemático) respecto a eficiencia total (593 N/m)

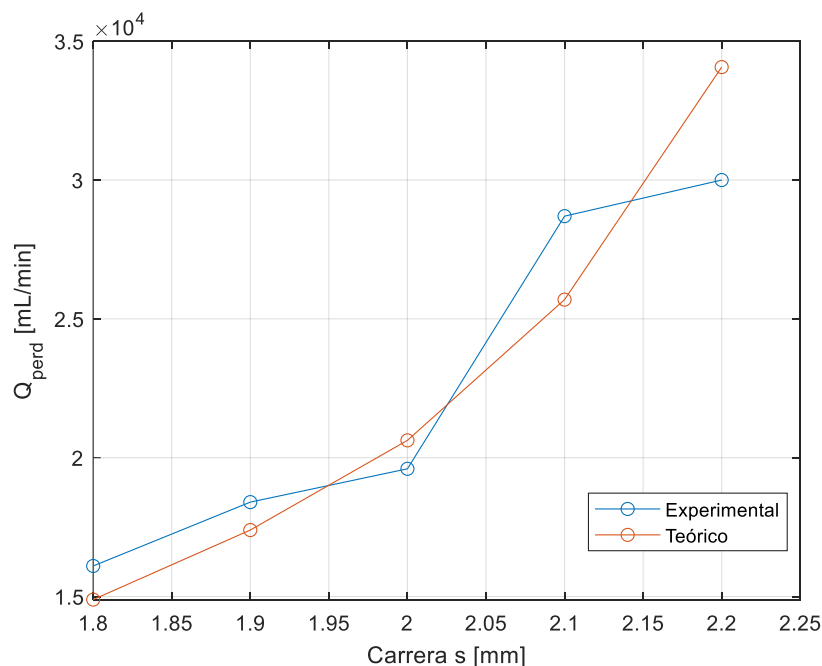


A partir de la figura 35, se observa que tanto el modelo teórico como los datos experimentales presentan una tendencia parabólica, lo que indica que existe un punto óptimo de operación cercano a una carrera de aproximadamente 2 mm donde la eficiencia es máxima. Aunque los valores experimentales son ligeramente superiores a los teóricos en algunos puntos, el comportamiento general coincide, validando la forma del modelo.

Las diferencias pueden atribuirse a pérdidas no consideradas en el modelo, como fricción o efectos dinámicos del sistema. En general, el modelo teórico describe adecuadamente la tendencia del sistema real.

Se analiza el comportamiento del caudal perdido en función de la carrera del sistema, comparando los resultados experimentales con el modelo teórico para evaluar su precisión.

Figura 36. Experimentales de Quiroga-Méndez et al. (2013) y teóricos (modelo matemático) respecto a caudal perdido (593 N/m)



La figura 36 muestra que el caudal perdido aumenta con la carrera, presentando una tendencia creciente en ambos casos. El modelo teórico sigue adecuadamente el comportamiento experimental, aunque con algunas diferencias en valores altos, posiblemente debido a pérdidas adicionales no consideradas. En general, se observa una buena correlación entre ambos resultados.

6.2 RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL PROTOTIPO PROPUESTO

En la siguiente tabla se presentan los datos experimentales obtenidos a partir del prototipo propuesto:

Tabla 20. Resultados toma de datos

TOMA DE DATOS 1								
AREA VAL. DESCARGA 1: D 0.5 Pulg= 12.7 mm								
AREA VAL. IMPULSO 1: D 3/4 pulg= 19.05 mm								
CAUDAL DE ENTRADA [L/MIN]	CARRERA DE VALVULA [mm]	PRESIÓN ENTRADA	PRESIÓN SALIDA	FRECUENCIA [PULSOS/min]	CAUDAL PERDIDO [L/min]	CAUDAL DESCARGADO [L/min]	Qdes/Qtot	η TOTAL
6.667	0.9	0.068 BAR	0.6206	168	3.867	2.8	0.2658	0.770
6.533					3.866	2.667	0.2565	0.748
6.4					3.6	2.8	0.2800	0.802
6.267					3.334	2.933	0.3055	0.858
6.267					3.59	2.677	0.2716	0.783

6.3 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA TOMA DE DATOS DEL PROTOTIPO Y EL MODELO MATEMÁTICO

En la tabla 21 se presenta la comparación entre los resultados obtenidos mediante el modelo matemático y los valores medidos experimentalmente en la bomba de ariete, utilizando un caso base para un resorte con constante de 50 N/m. En base a estos datos se observa que los valores teóricos y experimentales presentan un comportamiento similar en las variables analizadas, como la frecuencia de pulsos, el caudal perdido, el caudal descargado y la eficiencia.

Aunque existen pequeñas diferencias entre ambos resultados, estas variaciones son esperadas debido a factores propios del sistema real, como pérdidas adicionales, fricción en los componentes y condiciones de operación no ideales. En general, los resultados muestran que el modelo matemático representa adecuadamente el comportamiento de la bomba, permitiendo estimar de forma razonable el desempeño del sistema.

Tabla 21. Teórico vs experimental (50 N/m)

Variable	Resorte: 50N/m	
	Teórico	Experimental
Frecuencia de pulsos	180.143	168
Qperdido	3.586	3.6514
Qdescargado	2.68	2.7754
Eficiencia (η)	0.79	0.7922

6.3.1 Efecto de las características del ariete respecto al rendimiento del sistema. Para esta primera configuración se introdujeron los siguientes datos de entrada para cada uno de los resortes:

- Diámetro válvula impulso: $\frac{3}{4}$ pulgada
- Diámetro válvula descarga: $\frac{1}{2}$ pulgada
- Altura alimentación: 1.5 m
- Altura descarga: 2.75 m
- Carrera de válvula (s): [0.65 a 1.15] mm

Configuración hidráulica 1: Resorte 50 N/m y 56 N/m a diferentes carreras de válvula de impulsión.

En esta sección se exponen los resultados obtenidos para la configuración hidráulica 1.

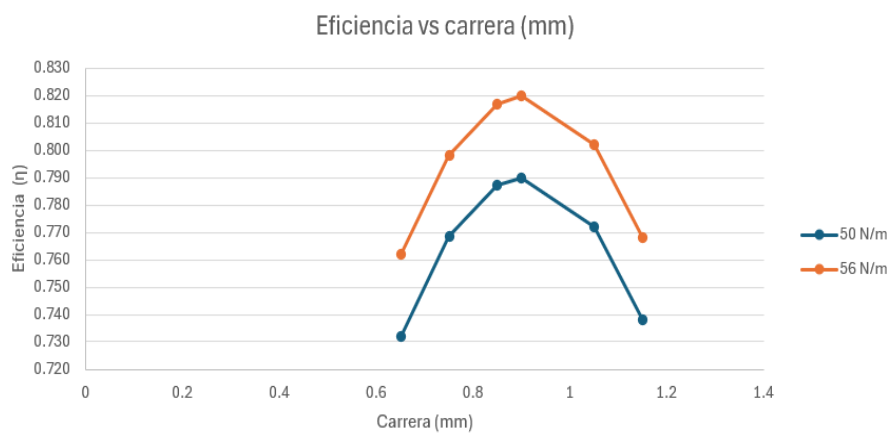
Tabla 22. Resultados del modelo matemático para un resorte de 50 N/m a diferentes carreras(s)

Dimpulso: 3/4 pulg	Ddescarga: 1/2 pulg	K=50 N/m	Hali=1.5 m	Hdesc=2.75 m		
CARRERA DE VALVULA [mm]	FRECUENCIA [PULSOS/min]	CAUDAL PERDIDO [L/s]	CAUDAL DESCARGADO [L/s]	Qtot	Qdes/Qtot	η TOTAL
0.65	215.1	2.805	2.772	5.577	0.4970	0.732
0.75	199.2	3.087	2.654	5.741	0.4623	0.768
0.85	186	3.408	2.648	6.056	0.4373	0.787
0.9	180.1	3.586	2.68	6.266	0.4277	0.790
1.05	165	4.307	2.894	7.201	0.4019	0.772
1.15	156.4	4.704	3.12	7.824	0.3988	0.738

Tabla 23. Resultados del modelo matemático para un resorte de 56 N/m a diferentes carreras(s)

Dimpulso: 3/4 pulg	Ddescarga: 1/2 pulg	K=56 N/m	Hali=1.5 m	Hdesc=2.75 m		
CARRERA DE VALVULA [mm]	FRECUENCIA [PULSOS/min]	CAUDAL PERDIDO [L/s]	CAUDAL DESCARGADO [L/s]	Qtot	Qdes/Qtot	η TOTAL
0.65	208.5	2.981	2.703	5.684	0.4755	0.762
0.75	193	3.282	2.586	5.868	0.4407	0.798
0.85	186	3.625	2.579	6.204	0.4157	0.817
0.9	174.3	3.816	2.609	6.425	0.4061	0.820
1.05	159.5	4.481	2.815	7.296	0.3858	0.802
1.15	151.1	5.013	3.033	8.046	0.3770	0.768

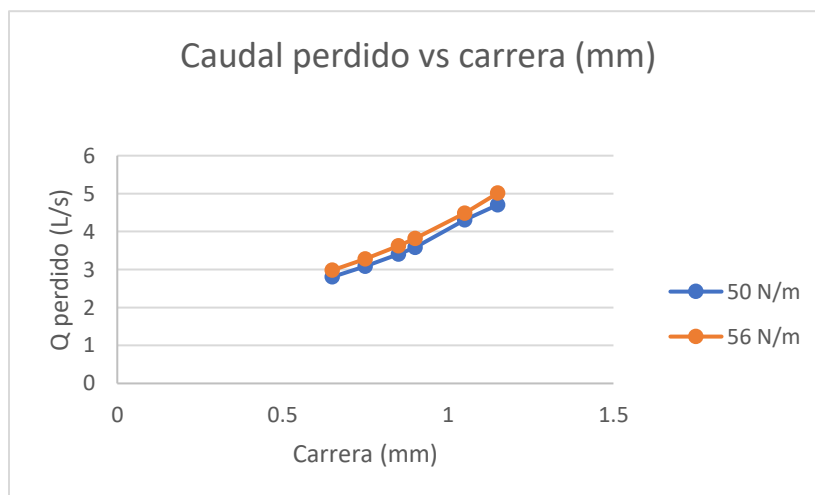
Figura 37. Eficiencia total teórica en función de la carrera (50 y 56 N/m)



La figura 37 muestra el comportamiento de la eficiencia total en función de la carrera de válvula muestra, para ambos resortes, una tendencia de parábola invertida, similar a la reportada en la tesis de referencia para el análisis de la influencia del resorte.

Esto significa que existe una carrera de válvula óptima para la cual el sistema alcanza su mejor desempeño energético. En el presente modelo, dicha zona óptima se ubica aproximadamente entre 0.85 y 0.90 mm. Además, la curva correspondiente al resorte de 56 N/m se encuentra por encima de la del resorte de 50 N/m, indicando que, dentro del rango estudiado, el aumento de la constante elástica produjo una mejora de la eficiencia total.

Figura 38. Caudal perdido teórico en función de la carrera (50 y 56 N/m)



Se evidencia una tendencia creciente para ambos resortes conforme aumenta la carrera de válvula. Este comportamiento indica que una mayor apertura favorece el desfogue de una mayor cantidad de agua, incrementando las pérdidas del sistema. Asimismo, el resorte de 56

N/m presenta valores de caudal perdido ligeramente superiores a los del resorte de 50 N/m en todo el rango analizado.

Configuración hidráulica 1: Resorte 52 N/m y 54 N/m a diferentes carreras de válvula de impulsión.

En esta sección se exponen los resultados obtenidos para la configuración hidráulica 1.

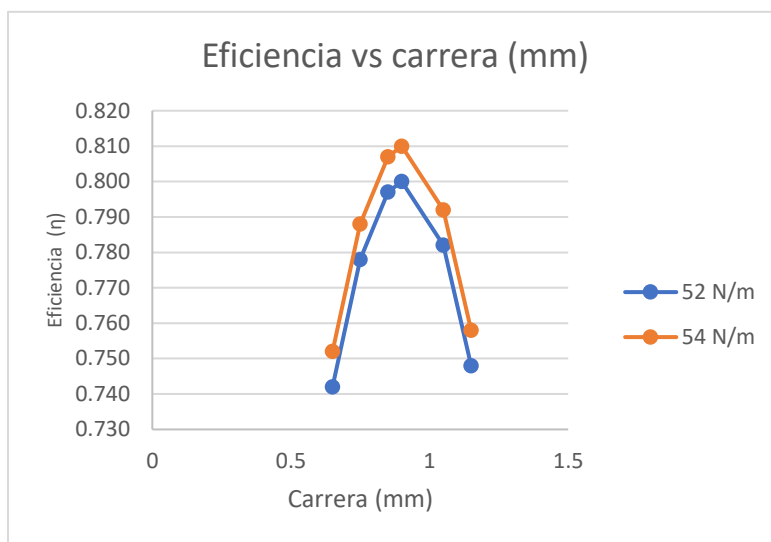
Tabla 24. Resultados del modelo matemático para un resorte de 52 N/m a diferentes carreras (s)

Dimpulso:3/4 pulg	Ddescarga: 1/2 pulg	K=52 N/m	Hali=1.5 m	Hdesc=2.75 m		
CARRERA DE VALVULA [mm]	FRECUENCIA [PULSOS/min]	CAUDAL PERDIDO [L/s]	CAUDAL DESCARGADO [L/s]	Qtotal	Qdes/Qtot	η TOTAL
0.65	212.8	2.864	2.748	5.612	0.4897	0.742
0.75	197	3.153	2.631	5.784	0.4549	0.778
0.85	183.9	3.481	2.624	6.105	0.4298	0.797
0.9	178.1	3.664	2.656	6.32	0.4203	0.800
1.05	163.1	4.299	2.867	7.166	0.4001	0.782
1.15	154.6	4.808	3.09	7.898	0.3912	0.748

Tabla 25. Resultados del modelo matemático para un resorte de 54 N/m a diferentes carreras (s)

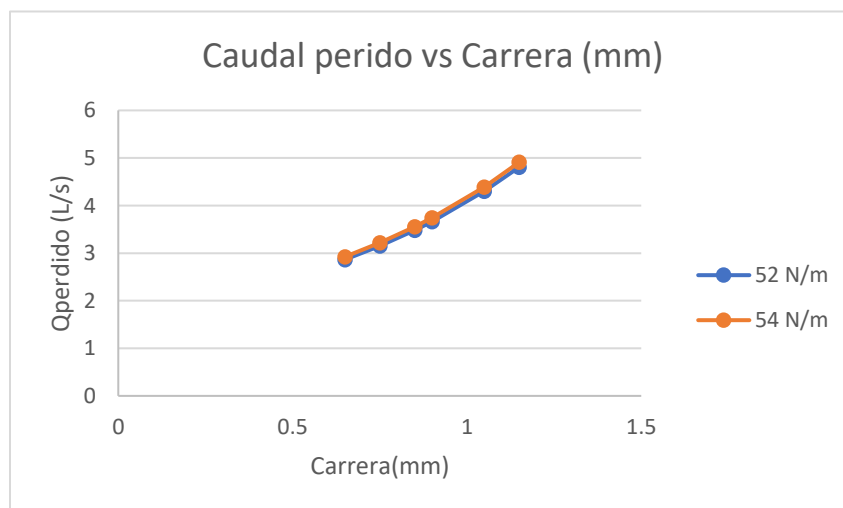
Dimpulso:3/4 pulg	Ddescarga: 1/2 pulg	K=54 N/m	Hali=1.5 m	Hdesc=2.75 m		
CARRERA DE VALVULA [mm]	FRECUENCIA [PULSOS/min]	CAUDAL PERDIDO [L/s]	CAUDAL DESCARGADO [L/s]	Qtotal	Qdes/Qtot	η TOTAL
0.65	210.6	2.923	2.725	5.648	0.4825	0.752
0.75	194.9	3.218	2.608	5.826	0.4476	0.788
0.85	181.9	3.554	2.601	6.155	0.4226	0.807
0.9	176.2	3.744	2.632	6.376	0.4128	0.810
1.05	161.3	4.391	2.84	7.231	0.3928	0.792
1.15	152.8	4.911	3.061	7.972	0.3840	0.758

Figura 39. Eficiencia total teórica en función de la carrera (52 y 54 N/m)



La figura 39 muestra la relación entre la eficiencia y la carrera de la válvula para resortes de 52 y 54 N/m. Se observa que la eficiencia aumenta hasta un valor máximo cercano a 0,9 mm y luego disminuye, cumpliéndose la tendencia experimental en forma de campana, donde el resorte de 54 N/m presenta valores ligeramente superiores.

Figura 40. Caudal perdido teórico en función de la carrera (52 y 54 N/m)



La figura 40 muestra la variación del caudal perdido con la carrera de la válvula para resortes de 52 y 54 N/m. Se observa que el caudal perdido aumenta de forma progresiva al incrementar la carrera, cumpliéndose la tendencia teórica creciente, con valores muy similares para ambos resortes.

Posteriormente, en la siguiente configuración teórica, se realizó una variación del diámetro de impulsión de la válvula de pie, incrementándolo desde 3/4 de pulgada hasta 1 pulgada y así mismo se realizó el mismo procedimiento para los 4 resortes usados anteriormente con sus mismas carreras, mientras que los demás parámetros del sistema se mantuvieron constantes, como se muestra a continuación.

Datos de entrada:

- D válvula impulso: 1 pulgada
- D válvula descarga: 1/2 pulgada
- H alimentación: 1.5 m
- H descarga: 2.75 m
- Carrera de válvula (s): [0.65 a 1.15] mm
- volumen acumulador: 1 Litro

Configuración hidráulica 2: Variación de diámetro de válvula de impulsión a 1 pulgada para un resorte de 50 N/m y 56 N/m.

En esta sección se exponen los resultados obtenidos para la configuración hidráulica 2.

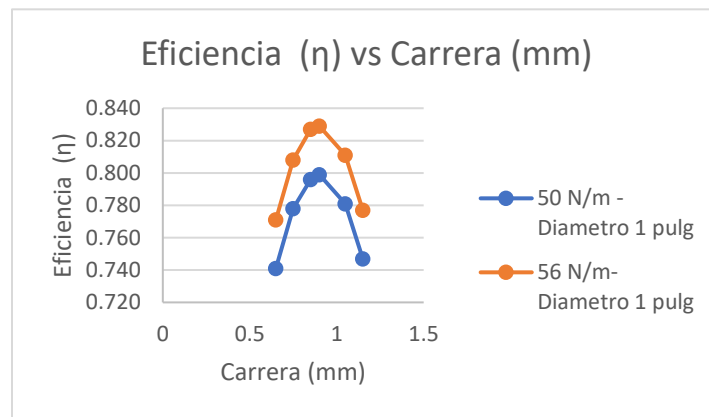
Tabla 26. Resultados del modelo matemático para un resorte de 50 N/m a un diámetro de impulsión variable

Dimpulso:1 pulg	Ddescarga: 1/2 pulg	K=50 N/m	Hali=1.5 m	Hdesc=2.75 m		
CARRERA DE VALVULA [mm]	FRECUENCIA [PULSOS/min]	CAUDAL PERDIDO [L/s]	CAUDAL DESCARGADO [L/s]	Qtotal	Qdes/Qtot	η TOTAL
0.65	269.3	2.134	3.734	5.868	0.6363	0.741
0.75	256.2	2.348	3.587	5.935	0.6044	0.778
0.85	234.3	2.59	3.59	6.18	0.5809	0.796
0.9	227.3	2.724	3.639	6.363	0.5719	0.799
1.05	209	3.19	3.946	7.136	0.5530	0.781
1.15	198.7	3.562	4.267	7.829	0.5450	0.747

Tabla 27. Resultados del modelo matemático para un resorte de 56 N/m a un diámetro de impulsión variable

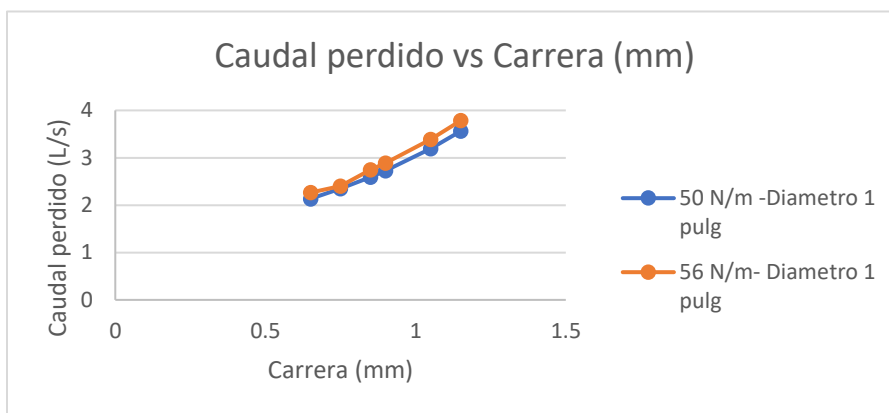
Dimpulso:1 pulg	Ddescarga: 1/2 pulg	K=56 N/m	Hali=1.5 m	Hdesc=2.75 m		
CARRERA DE VALVULA [mm]	FRECUENCIA [PULSOS/min]	CAUDAL PERDIDO [L/s]	CAUDAL DESCARGADO [L/s]	Qtotol	Qdes/Qtot	η TOTAL
0.65	261.7	2.265	3.65	5.915	0.6171	0.771
0.75	243.1	2.402	3.505	5.907	0.5934	0.808
0.85	227.5	2.749	3.507	6.256	0.5606	0.827
0.9	220.7	2.892	3.554	6.446	0.5513	0.829
1.05	202.8	3.388	3.852	7.24	0.5320	0.811
1.15	192.7	3.784	4.163	7.947	0.5238	0.777

Figura 41. Eficiencia total teórica en función de la válvula de impulsión (50 y 56 N/m)



Para la figura 41 se presenta la eficiencia en función de la carrera de la válvula para resortes de 50 y 56 N/m con diámetro de impulsión de 1 pulgada. De forma similar a las gráficas anteriores con variables equivalentes, se observa que se mantiene la tendencia teórica en forma de campana, donde la eficiencia aumenta hasta un valor máximo cercano a 0,9 mm y posteriormente disminuye. Además, el resorte de 56 N/m muestra valores de eficiencia ligeramente mayores.

Figura 42. Caudal perdido teórico en función de la válvula de impulsión (50 y 56 N/m)



En la figura 42 se muestra la variación del caudal perdido con la carrera de la válvula para resortes de 50 y 56 N/m con diámetro de impulsión de 1 pulgada. De manera similar a las gráficas anteriores con las mismas variables, se mantiene la tendencia teórica creciente, donde el caudal perdido aumenta progresivamente al incrementarse la carrera, presentando valores muy cercanos para ambos resortes.

Configuración hidráulica 2: Diámetro de válvula de impulsión de 1 pulgada para un resorte de 52 N/m y 54 N/m.

En esta sección se exponen los resultados obtenidos para la configuración hidráulica 2.

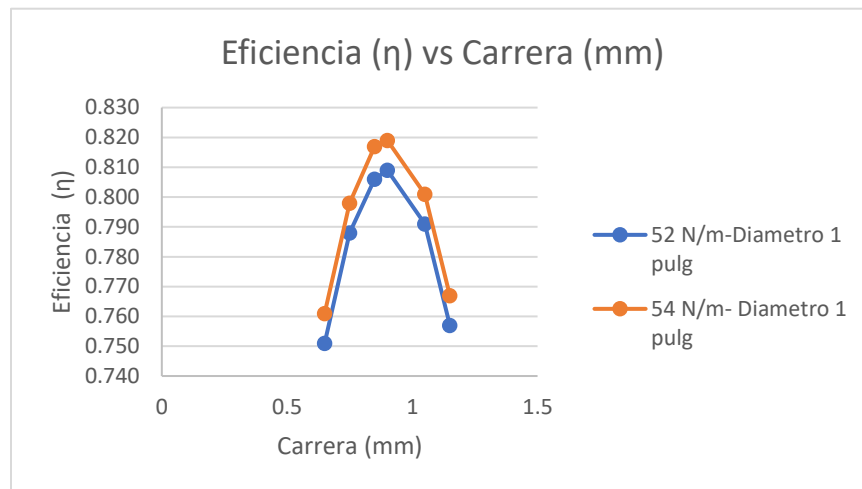
Tabla 28. Resultados del modelo matemático para un resorte de 52 N/m a un diámetro de impulsión variable

Dimpulso:1 pulg	Ddescarga: 1/2 pulg	K=52 N/m	Hali=1.5 m	Hdesc=2.75 m		
CARRERA DE VALVULA [mm]	FRECUENCIA [PULSOS/min]	CAUDAL PERDIDO [L/s]	CAUDAL DESCARGADO [L/s]	Qtot	Qdes/Qtot	η TOTAL
0.65	266.7	2.178	3.705	5.883	0.6298	0.751
0.75	247.7	2.397	3.559	5.956	0.5975	0.788
0.85	232	2.644	3.561	6.205	0.5739	0.806
0.9	225	2.781	3.61	6.391	0.5649	0.809
1.05	206.9	3.257	3.914	7.171	0.5458	0.791
1.15	196.6	3.637	4.231	7.868	0.5377	0.757

Tabla 29. Resultados del modelo matemático para un resorte de 54 N/m a un diámetro de impulsión variable

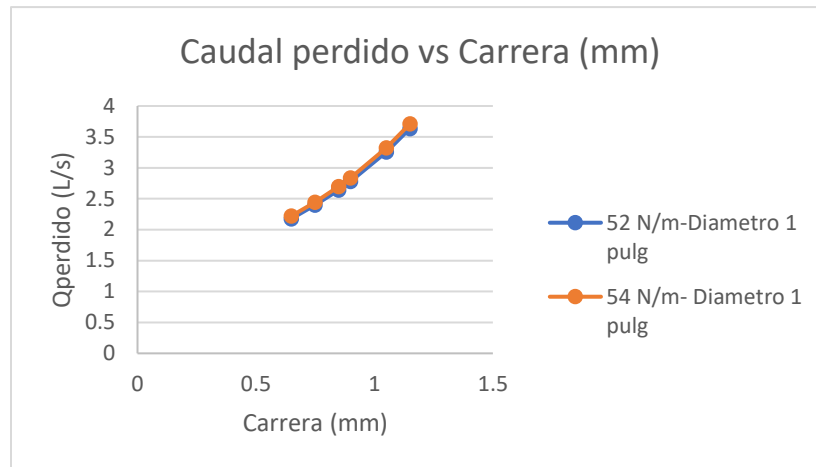
Dimpulso:1 pulg	Ddescarga: 1/2 pulg	K=54 N/m	Hali=1.5 m	Hdesc=2.75 m		
CARRERA DE VALVULA [mm]	FRECUENCIA [PULSOS/min]	CAUDAL PERDIDO [L/s]	CAUDAL DESCARGADO [L/s]	Qtot	Qdes/Qtot	η TOTAL
0.65	264.2	2.222	3.877	6.099	0.6357	0.761
0.75	245.4	2.445	3.531	5.976	0.5909	0.798
0.85	229.7	2.697	3.533	6.23	0.5671	0.817
0.9	222.8	2.837	3.581	6.418	0.5580	0.819
1.05	204.8	3.323	3.882	7.205	0.5388	0.801
1.15	194.7	3.711	4.196	7.907	0.5307	0.767

Figura 43. Eficiencia total teórica en función de la válvula de impulsión (52 y 54 N/m)



La figura 43 confirma, al igual que en los casos anteriores, que la eficiencia sigue una tendencia de campana respecto a la carrera de la válvula para resortes de 52 y 54 N/m con diámetro de impulsión de 1 pulgada. La eficiencia aumenta hasta un valor máximo cercano a 0,8–0,9 mm y luego disminuye, con un desempeño ligeramente superior para el resorte de 54 N/m.

Figura 44. Caudal perdido teórico en función de la válvula de impulsión (52 y 54 N/m)



La figura 44 muestra que el caudal perdido aumenta con la carrera de la válvula para resortes de 52 y 54 N/m con diámetro de impulsión de 1 pulgada. De manera consistente con las gráficas anteriores, se mantiene la tendencia teórica creciente, presentando además valores muy similares para ambos resortes.

Finalmente, se estudió una configuración en la que se modificó el diámetro de la válvula de descarga tipo bola en un intervalo comprendido entre 1/2 pulgada y 3/8 pulgada, correspondiendo este último a una dimensión comercial disponible en el mercado. Para este caso, las demás condiciones de entrada del sistema se mantuvieron constantes, con el fin de analizar su efecto sobre la eficiencia y el caudal perdido, variables de mayor relevancia en el presente proyecto.

Datos de entrada:

- D válvula impulso: 3/4 pulgada
- D válvula descarga: 3/8 pulgada
- H alimentación: 1.5 m
- H descarga: 2.75 m
- Carrera de válvula (s): [0.65 a 1.15] mm
- volumen acumulador: 1 Litro

Configuración hidráulica 3: Resortes de 50 Y 56 N/m para un diámetro de descarga de 3/8 pulgada

En esta sección se exponen los resultados obtenidos para la configuración hidráulica 3.

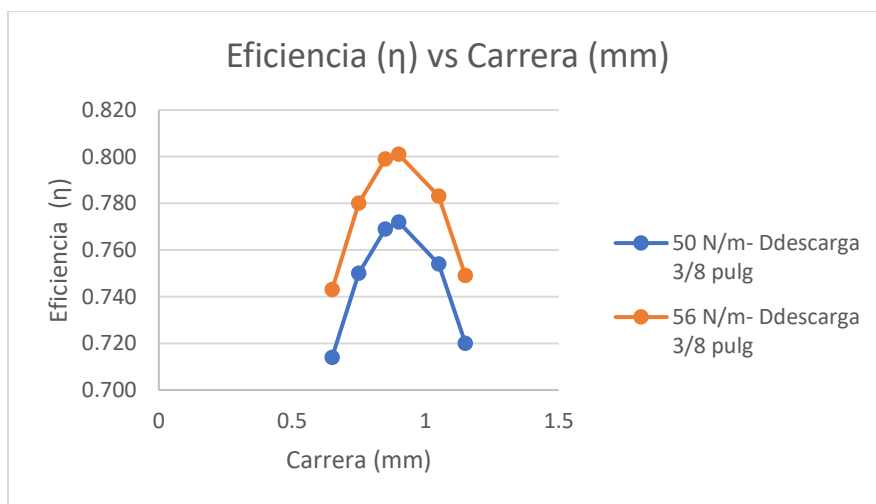
Tabla 30. Resultados del modelo matemático para un resorte de 50 N/m a un diámetro de descarga variable

Dimpulso:3/4 pulg	Ddescarga: 3/8 pulg	K=50 N/m	Hali=1.5 m	Hdesc=2.75 m		
CARRERA DE VALVULA [mm]	FRECUENCIA [PULSOS/min]	CAUDAL PERDIDO [L/s]	CAUDAL DESCARGADO [L/s]	Qtotal	Qdes/Qtot	η TOTAL
0.65	217.3	2.875	2.619	5.494	0.4767	0.714
0.75	201.2	3.163	2.51	5.673	0.4424	0.750
0.85	187.8	3.491	2.505	5.996	0.4178	0.769
0.9	181.9	3.674	2.536	6.21	0.4084	0.772
1.05	166.6	4.309	2.74	7.049	0.3887	0.754
1.15	157.9	4.818	2.955	7.773	0.3802	0.720

Tabla 31. Resultados del modelo matemático para un resorte de 56 N/m a un diámetro de descarga variable

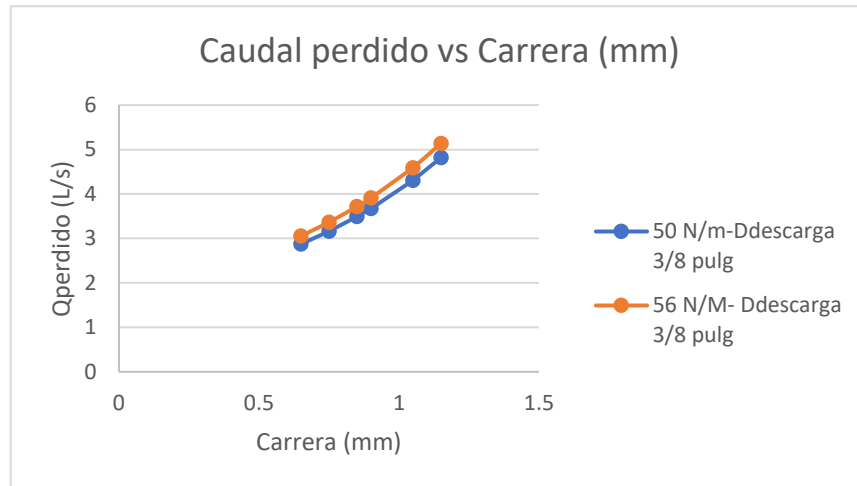
Dimpulso:3/4 pulg	Ddescarga: 3/8 pulg	K=56 N/m	Hali=1.5 m	Hdesc=2.75 m		
CARRERA DE VALVULA [mm]	FRECUENCIA [PULSOS/min]	CAUDAL PERDIDO [L/s]	CAUDAL DESCARGADO [L/s]	Qtotal	Qdes/Qtot	η TOTAL
0.65	210.6	3.055	2.554	5.609	0.4553	0.743
0.75	194.9	3.363	2.446	5.809	0.4211	0.780
0.85	181.8	3.714	2.44	6.154	0.3965	0.799
0.9	176.1	3.91	2.469	6.379	0.3871	0.801
1.05	161.1	4.59	2.665	7.255	0.3673	0.783
1.15	152.6	5.134	2.872	8.006	0.3587	0.749

Figura 45. Eficiencia total teórica en función de la válvula de descarga (50 y 56 N/m)



Para la figura 45 se observa la eficiencia en función de la carrera de la válvula para resortes de 50 y 56 N/m con descarga de 3/8 de pulgada. Se observa que la eficiencia alcanza su punto máximo alrededor de 0,9 mm, disminuyendo después, y que el resorte de 56 N/m logra un mejor desempeño general.

Figura 46. Caudal perdido teórico en función de la válvula de descarga (50 y 56 N/m)



La figura 46 muestra cómo varía el caudal perdido con la carrera de la válvula para resortes de 50 y 56 N/m con descarga de 3/8 de pulgada. Se observa que el caudal perdido aumenta gradualmente al incrementar la carrera, con valores muy cercanos para ambos resortes.

Configuración hidráulica 3: Resortes de 52 Y 54 N/m para un Diámetro de descarga de 3/8 pulgada.

En esta sección se exponen los resultados obtenidos para la configuración hidráulica 3.

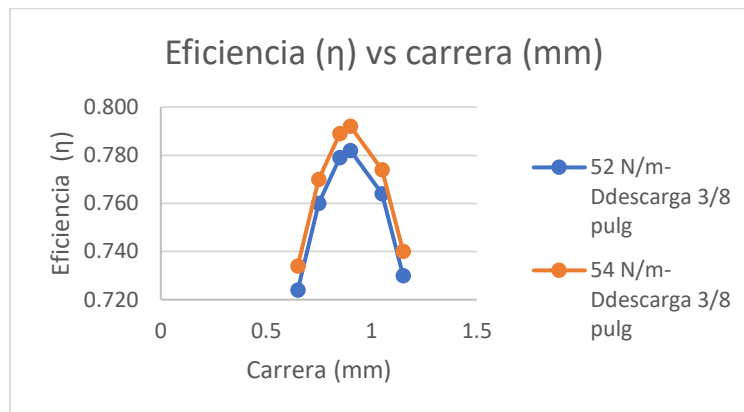
Tabla 32. Resultados del modelo matemático para un resorte de 52 N/m a un diámetro de descarga variable

Dimpulso:3/4 pulg	Ddescarga: 3/8 pulg	K=52 N/m	Hali=1.5 m	Hdesc=2.75 m		
CARRERA DE VALVULA [mm]	FRECUENCIA [PULSOS/min]	CAUDAL PERDIDO [L/s]	CAUDAL DESCARGADO [L/s]	Qtotal	Qdes/Qtot	η TOTAL
0.65	215	2.936	2.597	5.533	0.4694	0.724
0.75	199	3.231	2.488	5.719	0.4350	0.760
0.85	185.7	3.567	2.483	6.05	0.4104	0.779
0.9	179.9	3.753	2.513	6.266	0.4011	0.782
1.05	164.7	4.404	2.714	7.118	0.3813	0.764
1.15	156.1	4.924	2.926	7.85	0.3727	0.730

Tabla 33. Resultados del modelo matemático para un resorte de 54 N/m a un diámetro de descarga variable

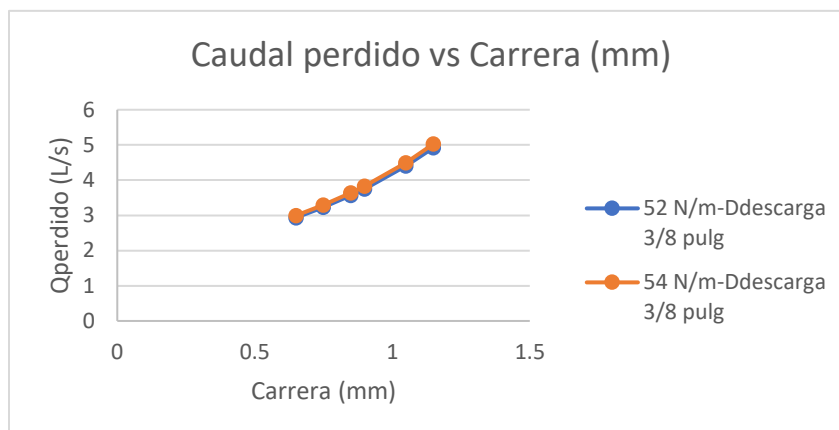
Dimpulso:3/4 pulg	Ddescarga: 3/8 pulg	K=54 N/m	Hali=1.5 m	Hdesc=2.75 m		
CARRERA DE VALVULA [mm]	FRECUENCIA [PULSOS/min]	CAUDAL PERDIDO [L/s]	CAUDAL DESCARGADO [L/s]	Qtotal	Qdes/Qtot	η TOTAL
0.65	212.7	2.996	2.575	5.571	0.4622	0.734
0.75	196.9	3.298	2.466	5.764	0.4278	0.770
0.85	183.7	3.641	2.461	6.102	0.4033	0.789
0.9	177.9	3.832	2.491	6.323	0.3940	0.792
1.05	162.8	4.497	2.689	7.186	0.3742	0.774
1.15	154.3	5.03	2.899	7.929	0.3656	0.740

Figura 47. Eficiencia total teórica en función de la válvula de descarga (52 y 54 N/m)



En la figura 47 se muestra la relación entre la eficiencia y la carrera de la válvula para dos resortes (52 y 54 N/m) con descarga de 3/8 de pulgada. Se observa que la eficiencia aumenta hasta un máximo cercano a 0,9 mm y luego disminuye, siendo ligeramente mayor para el resorte de 54 N/m.

Figura 48. Caudal perdido teórico en función de la válvula de descarga (52 y 54 N/m)



La figura 48 muestra la relación entre el caudal perdido y la carrera de la válvula para resortes de 52 y 54 N/m con descarga de 3/8 de pulgada. Se observa que el caudal perdido aumenta progresivamente al incrementar la carrera, presentando valores muy similares para ambos resortes.

6.3 RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad del modelo del ariete hidráulico se realizó con el objetivo de evaluar la influencia de los principales parámetros sobre el comportamiento del sistema. A partir de la variación de la constante del resorte, la carrera de la válvula de impulsión y los diámetros de impulsión y descarga, se obtuvieron resultados para cada uno de los métodos aplicados (OAT, sensibilidad diferencial, índice de sensibilidad (SI) y factor de importancia (IF)), los cuales permitieron cuantificar el efecto de cada variable sobre la eficiencia y el desperdicio de agua. Estos resultados evidencian diferencias en el grado de influencia de los parámetros, facilitando la identificación de aquellos más relevantes para el desempeño del sistema.

Tabla 34. Método OAT

Método 1 - Once-at-a-time (máximo $ \% \Delta Y $)				
Variable	Frecuencia	Qperdido	Qdescargado	Eficiencia η
Carrera s	19,43%	31,18%	16,42%	7,34%
Constante K	3,22%	6,41%	2,65%	3,80%
Diámetro impulsión	26,21%	24,04%	35,78%	1,14%
Diámetro descarga	1,00%	2,45%	5,37%	2,28%

Los resultados del método OAT muestran que el diámetro de impulsión es la variable más influyente en la frecuencia de pulsos y en el caudal descargado, mientras que la carrera de la válvula (s) es la variable dominante en el caudal perdido y en la eficiencia. Esto indica que pequeñas variaciones en la carrera de la válvula pueden generar cambios importantes en el desperdicio de agua y en el rendimiento del sistema.

Tabla 35. Método Differential sensitivity

Método 2 - Differential sensitivity (promedio ϕ)				
Variable	Frecuencia	Qperdido	Qdescargado	Eficiencia η
Carrera s	0,5805	0,9682	0,2934	0,1732
Constante K	0,2722	0,5430	0,2228	0,3165
Diámetro impulsión	0,7862	0,7211	1,0735	0,0342
Diámetro descarga	0,0400	0,0982	0,2149	0,0911

En el análisis de sensibilidad diferencial se observa nuevamente que el diámetro de impulsión tiene una fuerte influencia en la frecuencia y en el caudal descargado. Sin embargo, en este método la constante del resorte (K) aparece como la variable más influyente en la eficiencia, lo cual indica que cambios locales en este parámetro pueden afectar el desempeño del sistema cerca del punto de operación analizado.

Tabla 36. Resultados del método de factor de importancia-Sensitivity Index

Método 3 - Sensitivity Index (SI)				
Variable	Frecuencia	Qperdido	Qdescargado	Eficiencia η
Carrera s	37,53%	67,70%	17,82%	7,92%
Constante K	3,33%	6,41%	2,72%	3,80%
Diámetro impulsión	26,21%	31,64%	35,78%	1,14%
Diámetro descarga	1,00%	2,45%	5,68%	2,33%

El índice de sensibilidad confirma que la carrera de la válvula (s) es la variable más influyente en el caudal perdido y también presenta una influencia importante en la eficiencia. Por otro lado, el diámetro de impulsión continúa siendo el parámetro dominante en el caudal descargado.

Tabla 37. Resultados del método de factor de importancia-IF

Método 4 - Importance Factor (IF)				
Variable	Frecuencia	Qperdido	Qdescargado	Eficiencia η
Carrera s	389,902222	0,439370	0,028445	0,000499
Constante K	4,656875	0,007415	0,000702	0,000125
Diámetro impulsión	556,960000	0,185761	0,229920	0,000020
Diámetro descarga	0,810000	0,001936	0,005184	0,000081

En el caso del factor de importancia se observa un comportamiento similar al de los métodos anteriores. La carrera de la válvula vuelve a ser la variable más influyente en el caudal perdido y en la eficiencia, mientras que el diámetro de impulsión domina la frecuencia y el caudal descargado.

6.3.1 Variable más influyente en el fenómeno del ariete.

Tabla 38. Resultados generales del análisis de sensibilidad

Variable más influyente por salida y método				
Método	Frecuencia	Qperdido	Qdescargado	Eficiencia η
OAT	Diámetro impulsión	Carrera s	Diámetro impulsión	Carrera s
Differential	Diámetro impulsión	Carrera s	Diámetro impulsión	Constante K
SI	Carrera s	Carrera s	Diámetro impulsión	Carrera s
IF	Diámetro impulsión	Carrera s	Diámetro impulsión	Carrera s

En la tabla 38 se evidencian los resultados del análisis de sensibilidad, donde se identifica la variable más influyente para cada variable de salida y para cada método aplicado. A partir de estos resultados se observa que la carrera de la válvula (s) y el diámetro de impulsión son los parámetros que presentan mayor influencia en el comportamiento de la bomba de ariete.

En particular, la carrera de la válvula resulta ser la variable dominante en el caudal perdido ($Q_{perdido}$) y también en la eficiencia, lo cual es importante ya que el objetivo del proyecto es de que se reduzca el desperdicio de agua y se mantenga una buena eficiencia del sistema. Por otro lado, el diámetro de impulsión presenta mayor influencia sobre la frecuencia de pulsos y el caudal descargado. Además, se observa que en el método de sensibilidad diferencial la

constante del resorte (K) aparece como la variable más influyente en la eficiencia, lo que indica que este parámetro también tiene un papel importante en el rendimiento del sistema.

6.3.2 Mejor configuración para el prototipo respecto a eficiencia.

Tabla 39. Elección de la configuración más eficiente del prototipo

Dimpulso: 1 pulg	Ddescarga: 1/2 pulg	K=56 N/m	Hali=1.5 m	Hdesc=2.75 m		
CARRERA DE VALVULA [mm]	FRECUENCIA [PULSOS/min]	CAUDAL PERDIDO [L/s]	CAUDAL DESCARGADO [L/s]	Qtot	Qdes/Qtot	η TOTAL
0,65	261,7	2,265	3,65	5,915	0,6171	0,771
0,75	243,1	2,402	3,505	5,907	0,5934	0,808
0,85	227,5	2,749	3,507	6,256	0,5606	0,827
0,9	220,7	2,892	3,554	6,446	0,5513	0,829
1,05	202,8	3,388	3,852	7,24	0,5320	0,811
1,15	192,7	3,784	4,163	7,947	0,5238	0,777

En la tabla 39 se muestran diferentes combinaciones de parámetros para la bomba de ariete. A partir de los resultados, se observa que la mayor eficiencia del sistema se obtiene cuando la carrera de la válvula es de 0,9 mm, con una eficiencia total de 0,829. Por esta razón, esta configuración se considera la más adecuada cuando el objetivo es maximizar la eficiencia de la bomba.

6.3.3 Mejor configuración para el prototipo respecto a caudal perdido.

Tabla 40. Elección de la mejor configuración del prototipo que minimiza el caudal perdido

Dimpulso: 3/4 pulg	Ddescarga: 1/2 pulg	K=52 N/m	Hali=1.5 m	Hdesc=2.75 m		
CARRERA DE VALVULA [mm]	FRECUENCIA [PULSOS/min]	CAUDAL PERDIDO [L/s]	CAUDAL DESCARGADO [L/s]	Qtot	Qdes/Qtot	η TOTAL
0,65	212,8	2,864	2,748	5,612	0,4897	0,742
0,75	197	3,153	2,631	5,784	0,4549	0,778
0,85	183,9	1,584	2,624	4,208	0,6236	0,797
0,9	178,1	3,664	2,656	6,32	0,4203	0,800
1,05	163,1	4,299	2,867	7,166	0,4001	0,782
1,15	154,6	4,808	3,09	7,898	0,3912	0,748

En la tabla 40 se presentan distintas configuraciones del sistema para analizar el caudal perdido. Se observa que el menor valor se obtiene cuando la carrera de la válvula es de 0,85 mm, con un caudal perdido de 1,584 L/s y una eficiencia de 0,797. Por lo tanto, esta configuración se considera la más adecuada cuando se busca reducir el desperdicio de agua en la bomba de ariete.

6.4 RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL CASO DE PROYECCIÓN REAL

A continuación, se muestran los resultados derivados de la proyección del caso real, los cuales fueron determinados mediante la implementación del modelo matemático desarrollado y el uso de los datos correspondientes a las condiciones reales de operación del sistema. Este análisis permite evaluar el comportamiento del ariete hidráulico bajo una altura de elevación definida de 30 metros como mínimo, considerando las características hidráulicas y geométricas del montaje propuesto mencionadas a continuación:

- Constante del resorte: 420 N/m
- D válvula impulso: 2.5 pulg
- D válvula descarga: ¾ pulg
- H alimentación: 6.20 m
- H descarga: 32 m
- Carrera de válvula (s): 22 mm

Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla e incluyen variables relevantes como el caudal descargado, la eficiencia del sistema y las pérdidas de agua asociadas al proceso, permitiendo así establecer una aproximación del desempeño del sistema en un entorno real.

Tabla 41. Resultados de la proyección del sistema hidráulico en el caso real

RESULTADOS PROYECCIÓN CASO REAL						
Área válvula de descarga 1: D 3/4 Pulg= 19.05 mm						
Área válvula de impulso 1: D 2 1/2 Pulg= 63.5 mm						
Caudal de entrada [L/MIN]	Carrera de válvula [mm]	Frecuencia [Pulsos/min]	Caudal perdido [L/min]	Caudal descargado [L/min]	Qdes/Qtot	η Total
81.51	22.00	71.91	77.37	4.134	0.051	0.262

Los resultados corresponden a una proyección en condiciones reales de operación de una bomba de ariete, donde se obtiene un caudal de entrada de 81,51 L/min y un caudal descargado de 4,134 L/min. Esto representa una relación Qdes/Qtot de 0,051 y una eficiencia total de 0,262. Este valor de eficiencia, aunque bajo, es coherente con sistemas reales, en los cuales intervienen diversos factores no considerados en modelos ideales. Entre estos se encuentran las pérdidas por fricción en las tuberías, fugas, pérdidas de carga en válvulas y el

comportamiento no ideal del golpe de ariete. En conjunto, estos efectos disminuyen el aprovechamiento de la energía hidráulica disponible.

6.4.1 Mejor configuración para el caso de estudio real respecto a eficiencia.

Tabla 42. Elección de la configuración más eficiente para el caso de estudio real

Dimpulso: 2 1/2 pulg	Ddescarga: 3/4 pulg	Hali= 6.2 m	Hdesc= 32 m			
CARRERA DE VALVULA [mm]	CONSTANTE DE RESORTE K [N/M]	FRECUENCIA [PULSOS/min]	CAUDAL PERDIDO [L/min]	CAUDAL DESCARGADO [L/min]	Qtotol	η TOTAL
10,6	325	127,275	39,811	7,052	46,863	0,776
10,9	309	128,23	39,318	7,1	46,418	0,789
11	305	128,356	39,242	7,106	46,348	0,791
14	320	111,301	47,393	6,24	53,633	0,605
18	380	88,328	62,536	5,029	67,565	0,384
22	420	71,905	77,372	4,134	81,506	0,261

La tabla 42 muestra las combinaciones evaluadas para maximizar la eficiencia de la bomba, manteniendo constantes las condiciones geométricas e hidráulicas del sistema. Se observa que la configuración con carrera de 11 mm y constante del resorte de 305 N/m presenta el mejor desempeño, alcanzando una eficiencia de 0,791.

6.4.2 Elección de la mejor configuración del caso de estudio real que minimiza el caudal perdido.

Tabla 43. Mejor configuración caso de estudio real que minimiza el caudal perdido

Dimpulso: 2 1/2 pulg	Ddescarga: 3/4 pulg	Hali= 6.2 m	Hdesc= 32 m			
CARRERA DE VALVULA [mm]	CONSTANTE DE RESORTE K [N/M]	FRECUENCIA [PULSOS/min]	CAUDAL PERDIDO [L/min]	CAUDAL DESCARGADO [L/min]	Qtotol	η TOTAL
15,6	207	127,093	39,038	7,043	46,081	0,788
15,8	204	127,064	39,021	7,042	46,063	0,789
16	201	127,056	38,994	7,041	46,036	0,789
16,2	199	126,809	39,077	7,029	46,106	0,786
16,4	196	126,838	39,034	7,03	46,065	0,787
22	420	71,905	77,372	4,134	81,506	0,261

En la tabla 43 se presentan las combinaciones analizadas para minimizar el caudal perdido, sin modificar los diámetros ni las alturas del sistema. Los resultados indican que la configuración con carrera de 16 mm y constante del resorte de 201 N/m permite obtener el menor caudal perdido, con un valor de 38,994 L/min, manteniendo a la vez un comportamiento hidráulico estable y superior al caso base.

7. CONCLUSIONES

1. El modelo matemático desarrollado, basado en el planteamiento de Kroll, permitió describir adecuadamente el comportamiento hidráulico del ariete, reproduciendo tendencias coherentes en la frecuencia de pulsos, caudal descargado, caudal perdido y eficiencia. La comparación con los datos experimentales mostró una concordancia aceptable, validando su capacidad predictiva para el análisis del sistema.
2. Mediante el análisis de sensibilidad se identificó que la carrera de la válvula de impulsión es el parámetro con mayor influencia sobre el caudal perdido y la eficiencia, mientras que el diámetro de impulsión controla principalmente la frecuencia de pulsos y el caudal descargado. La constante del resorte también afecta el desempeño, especialmente la eficiencia, pero su influencia es secundaria frente a los dos parámetros anteriores.
3. El análisis paramétrico evidenció que la carrera de la válvula de impulsión tiene un impacto significativo en el comportamiento del sistema, existiendo rangos óptimos en los cuales se maximiza la eficiencia y se minimiza el caudal perdido, mientras que valores extremos afectan negativamente el rendimiento.
4. Dado que la carrera de la válvula de impulsión resultó ser el factor más influyente en el desperdicio de agua, se concluye que cualquier estrategia orientada a reducir la huella hídrica debe enfocarse en el control preciso de este parámetro, lo cual puede lograrse mediante mecanismos de regulación de carrera.
5. La evaluación experimental del prototipo se realizó con una altura de suministro de 1,5 m (en lugar de 1 m como se planteó inicialmente, debido a requerimientos operativos mínimos del ariete), valor que garantizó un funcionamiento estable y repetible. Los resultados corroboraron las tendencias predichas por el modelo y demostraron que es posible reducir significativamente las pérdidas de agua y alcanzar eficiencias superiores al 80 por ciento mediante una selección adecuada de los parámetros de diseño. Esto posiciona al ariete hidráulico como una tecnología viable para el aprovechamiento eficiente del recurso hídrico en aplicaciones rurales, sin requerir energía externa.

6. El prototipo construido con materiales disponibles en ferreterías locales resultó de bajo costo, liviano, resistente a la corrosión y de fácil elaboración, sin requerir modificaciones adicionales. Su sencillez permite que sea trasladado, modificado o reparado en poco tiempo por personal no calificado. Estas ventajas, sumadas a su capacidad de bombear agua sin energía externa, lo convierten en una solución práctica y sostenible para reducir la huella hídrica en zonas rurales como fincas o pequeñas comunidades.
7. El análisis respecto a el prototipo con proyección al caso de estudio real permitió establecer que la mejora de la eficiencia se logra principalmente ajustando la carrera y la rigidez del resorte de la válvula de impulsión, porque estas dos variables controlan cómo se genera y se aprovecha el golpe de ariete. Eso sí, la eficiencia que reportamos es teórica, útil para comparar configuraciones y tendencias, pero no representa la eficiencia real del equipo. Esto se debe a que el modelo se planteó sin considerar pérdidas localizadas, no incluyendo todas las pérdidas que ocurren en la bomba real. Precisamente por eso la eficiencia calculada alcanzó un valor alto (79,1%), ya que en la realidad existen pérdidas por fricción, fugas y otros factores que el modelo no contempla.
8. En cuanto a reducir las pérdidas de agua, los resultados muestran que se pueden encontrar configuraciones más convenientes sin modificar la geometría principal del sistema. Esto confirma que el modelo sirve como una herramienta de apoyo para tomar decisiones de diseño y operación. Dicho esto, las configuraciones seleccionadas deben entenderse como una proyección técnica del comportamiento esperado, no como un valor definitivo. El modelo reproduce adecuadamente la tendencia general del fenómeno, y aunque pueden existir diferencias en la magnitud con respecto a los experimentos, esto no invalida su utilidad, pues lo relevante es su capacidad para orientar la selección de parámetros que reduzcan el caudal perdido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BÁRCENA, Alicia y PRADO, Antonio. Agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible: Una oportunidad para América Latina y el Caribe. En: Naciones Unidas. 2016, p. 20, 32. ISSN 16-00505.

CAMACHO GÓMEZ, Omar y TORRES DUCÓN, Edgar Leonardo. Sistema de bombeo con energía alternativa para la vereda Naranjal bajo municipio de Socorro. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, 2010. p. 32, 34, 40.

ESTRADA MORALES, Carlos Enrique. Estudio de factibilidad de un sistema de bombeo mediante un mecanismo de ariete hidráulico para la Universidad del Valle, Campus Sur. Trabajo de grado Ingeniería en Tecnología Industrial. Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2023. p. 24–25, 43, 60.

IDEAL, Bombas. Datos técnicos de hidráulica bombas. Valencia: Bombas Ideal Ediciones, 1974. p. 46–47.

LAEZ, David L. et al. Manual de Apuntes de la Experiencia Educativa de Hidráulica Básica [En línea]. Consultado: 9 de septiembre de 2025. Disponible en: <https://www.uv.mx/ingenieriacivil/files/2013/09/Manual-de-Hidraulica-Basica.pdf>

MATAIX, Claudio. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. 2. ed. México: Alfaomega, 1986. p. 315.

MEZA GONZÁLES, Guillermo. Análisis del funcionamiento de una bomba de ariete hidráulico artesanal con diámetro de una pulgada. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingenierías, 2019. p. 115.

MOTT, Robert L. y UNTENER, Joseph A. Applied Fluid Mechanics. 7. ed. Pearson, 2015. Apéndice A, Tabla A.1.

PALOMINO MARTÍNEZ, Michael. Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico para el fundo Porvenir, Huanta. Tesis para obtener el título de Ingeniero Agrícola. Ayacucho:

Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, 2016. p. 18–22.

PÉREZ, M. A. Bomba de ariete hidráulico [En línea]. Consultado: 15 de noviembre de 2025. Disponible en: <https://bombariete.blogspot.com/2018/05/calculo-de-caudal-de-elevacion-de-la.html>

RAJAONISON, Andriamahefasoa y RAKOTONDRAMIARANA, Hery Tiana. Theoretical Study of the Behavior of a Hydraulic Ram Pump with Springs System. En: American Journal of Fluid Dynamics. 2019, vol. 9, no. 1, p. 8. DOI: 10.5923/j.ajfd.20190901.01.

RIVADENEIRA, S. y SILVA, L. Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico con el desarrollo de un software para su dimensionamiento. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Quito: Universidad Politécnica Salesiana, Facultad de Ingenierías, 2013. p. 24, 31.

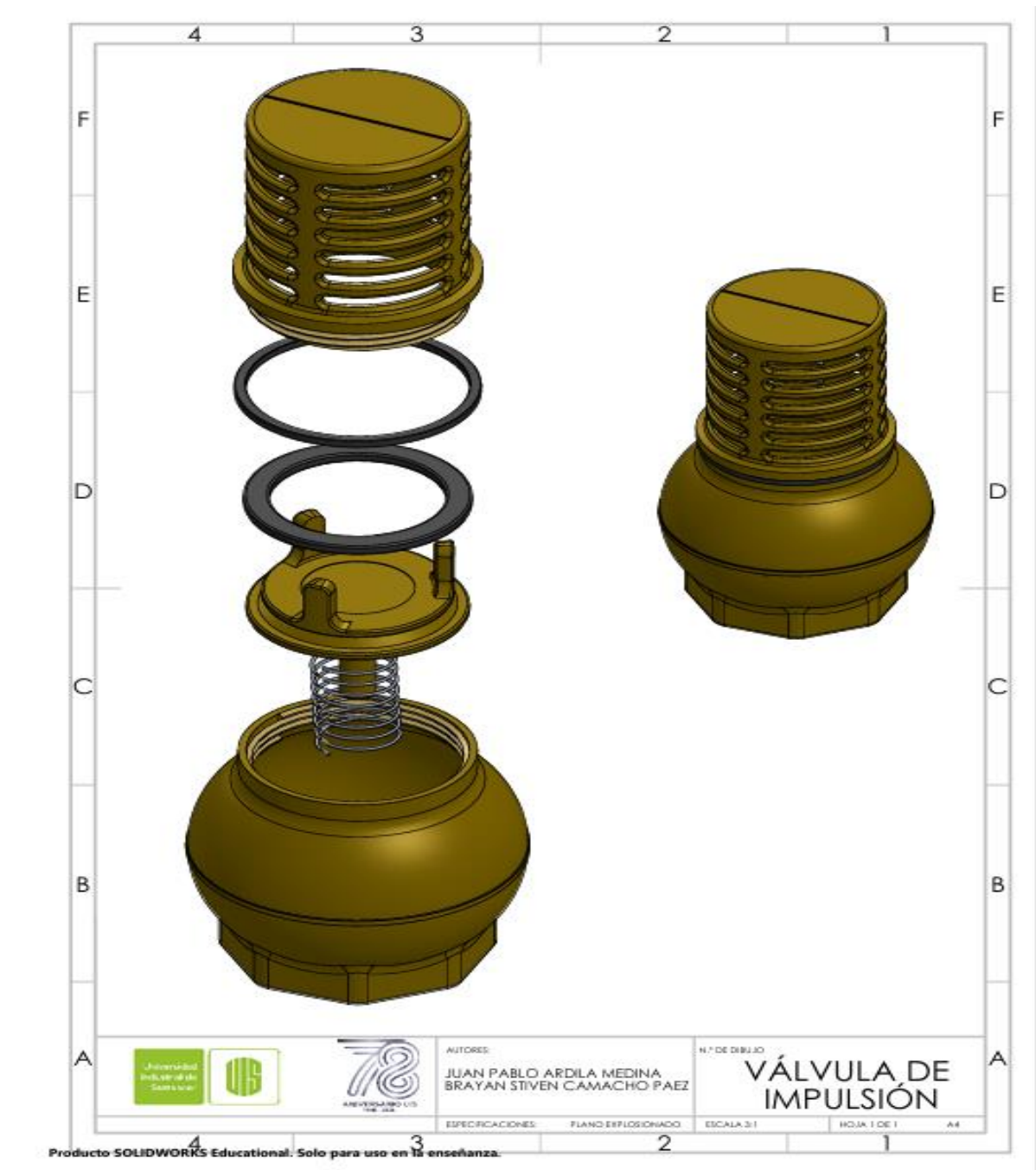
RIVADENEIRA CARLOSAMA, Santiago Xavier y SILVA ESPINOSA, Luis Fernando. Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico con el desarrollo de un software para su dimensionamiento. Tesis para obtener el título de Ingeniero Mecánico. Quito: Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Facultad de Ingenierías, Carrera de Ingeniería Mecánica, 2013. p. 34.

SIERRA GALLO, Carlos Andrés y BIANCHA GUTIÉRREZ, Gerson Eduardo. Análisis del ariete hidráulico para diferentes configuraciones. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, 2012. p. 57-103.

ANEXOS

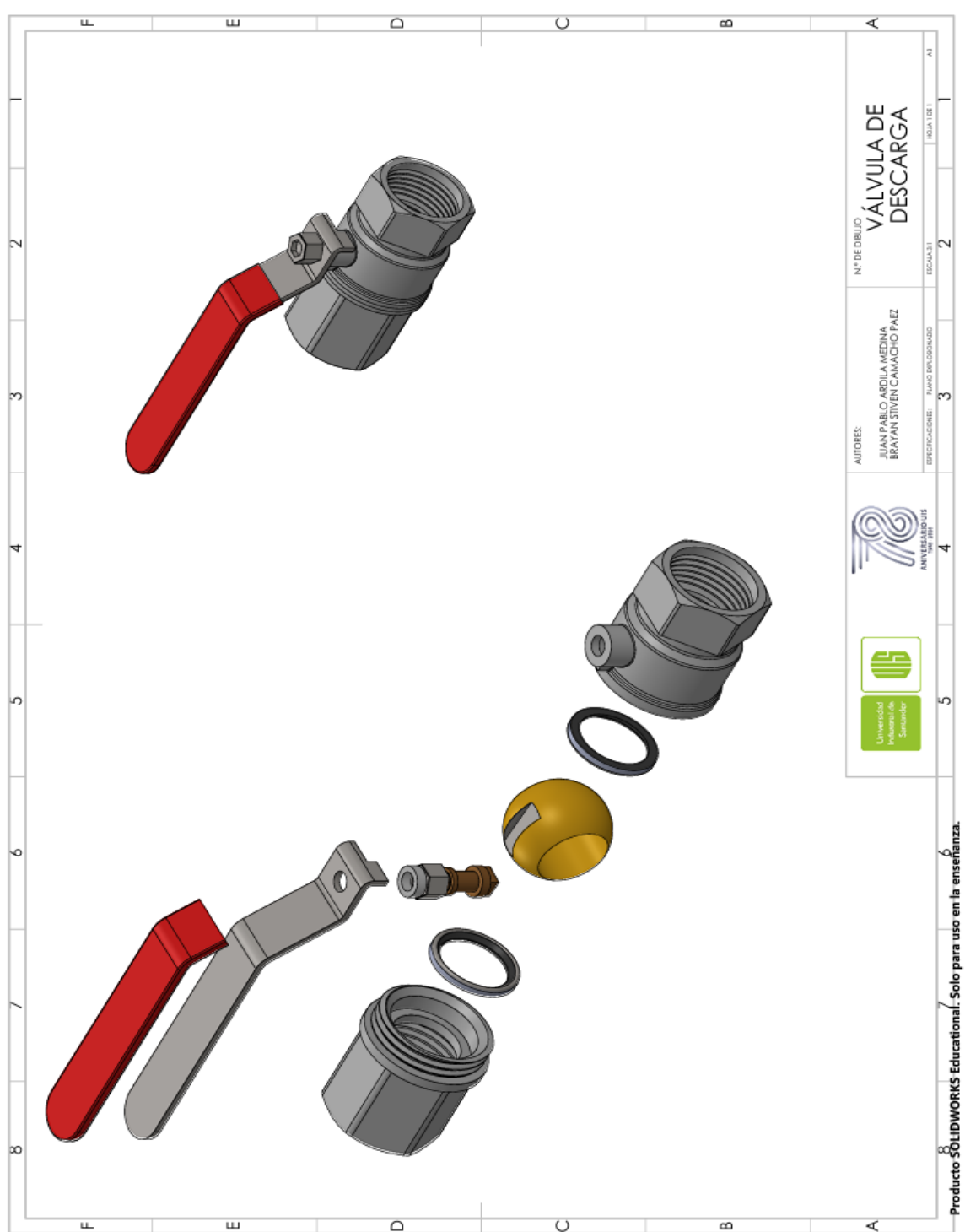
Anexo A. Planos de válvula de impulsión

Se presenta el diseño de la válvula de impulsión utilizada en el prototipo, donde se muestra el despiece detallado de cada uno de sus elementos, facilitando la comprensión de su estructura y principio de operación dentro del conjunto.




Anexo B. Planos de válvula de descarga

Se presenta el diseño y despiece de la válvula de descarga tipo bola empleada en el prototipo, permitiendo identificar sus componentes y comprender su funcionamiento dentro del sistema.



Anexo C. Ventana de análisis del modelo matemático

Se muestra la ventana de entrada de datos que permite al usuario ingresar los parámetros de entrada para cada caso planteado en el modelo matemático, evitando así la manipulación directa del código y facilitando su uso. El programa ha sido desarrollado en el software MATLAB, el cual utiliza un lenguaje de programación de alto nivel orientado al cálculo numérico, el análisis de datos y la modelación matemática, lo que permite una implementación eficiente y confiable del modelo propuesto.



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
Ingeniería Mecánica
Brayan Stiven Camacho Páez - Juan Pablo Ardila Medina

H [m]:	<input type="text"/>
h [m]:	<input type="text"/>
L [m]:	<input type="text"/>
Ldes [m]:	<input type="text"/>
D alimentación [mm]:	<input type="text"/>
D impulso [mm]:	<input type="text"/>
D check [mm]:	<input type="text"/>
D descarga [mm]:	<input type="text"/>
K [N/m]:	<input type="text"/>
s [mm]:	<input type="text"/>
Cd:	<input type="text"/>
SigmaK:	<input type="text"/>
c [m/s]:	<input type="text"/>
hr0:	<input type="text"/>
Kdes:	<input type="text"/>
kt:	<input type="text"/>