



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

COLEGIO DE INGENIERÍA CIVIL

**“MODELACIÓN DE BOMBA DE ARIETE HIDRÁULICO
BAJO DIFERENTES DIMENSIONES DE CÁMARA DE
AIRE”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN INGENIERÍA CIVIL

PRESENTA

FERNÁNDEZ MORALES ANDRÉ MIGUEL

MATRÍCULA: 201800414

ASESORA DE TESIS

M. EN I. SAMANTHA SANGABRIEL ALVARADO

JUNIO 2025

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi agradecimiento con la institución por haber sido el lugar donde obtuve las bases de mi conocimiento profesional, por facilitar los espacios donde viví grandes experiencias, por proporcionarme herramientas que me serán útiles en mi próxima etapa en la vida. Agradezco a mis profesores quienes en el transcurso de mis estudios me guiaron, corrigieron y apoyaron con el único fin de mi crecimiento individual, no solo con conocimientos, si no su confianza, con su tiempo, con respeto, con reciprocidad. A mis amigos y compañeros con quienes he compartido conocimientos y momentos que enriquecieron en mi persona. A mi asesora, la ingeniera Samantha Sangabriel Alvarado, quien con su dedicación y apoyo pude lograr el desarrollo de este trabajo a un nivel satisfactorio, además de permitirme ampliar mis horizontes y conseguir logros que no hubiera considerado posibles. A mi familia que en todo momento me dieron su apoyo incondicional.

Por permitirme compartir mis conocimientos, a usted lector, le agradezco.

DEDICATORIA

A mi mamá, quien con todo su amor y apoyo incondicional me ha permitido llegar hasta donde estoy siendo la persona que quiero ser.

RESUMEN

La interdependencia entre los recursos energéticos y el recurso hídrico es clave para el desarrollo sostenible. La producción y distribución de energía requieren grandes volúmenes de agua, mientras que el manejo del agua depende del suministro eléctrico. Esta relación se ha intensificado por el crecimiento demográfico, la urbanización y la expansión agrícola e industrial, generando presiones sobre ambos recursos.

En México, los sistemas de agua dependen de energía eléctrica para operar bombas, lo que crea vulnerabilidades, especialmente en zonas rurales donde los costos energéticos limitan el acceso al riego y abastecimiento. Esto ha impulsado la búsqueda de tecnologías sostenibles que reduzcan dicha dependencia.

Una alternativa destacada es la Bomba de Ariete Hidráulico, que utiliza la energía cinética del agua para bombear sin necesidad de electricidad ni combustibles fósiles. Su bajo costo, simplicidad y capacidad de operación continua, la hacen ideal para comunidades rurales y zonas con acceso limitado a energía.

Además de ser una solución técnica, esta tecnología promueve la sostenibilidad ambiental, reduce emisiones y fortalece la autonomía energética. Su implementación puede extenderse a comunidades pequeñas y zonas de difícil acceso, contribuyendo al uso eficiente de recursos naturales. La tesis propone el análisis y diseño de esta bomba como una opción viable para mejorar el abastecimiento de agua de forma responsable y sustentable.

ABSTRACT

The interdependence between energy and hydric resources is key to sustainable development. Energy production and distribution require high water volumes, while water management depends on the electricity supply. This relationship has intensified due to population growth, urbanization and the expansion agricultural and industrial, generating pressure on both resources.

In Mexico, the water systems rely on electric energy to operate pumping equipment, something that creates vulnerabilities, notably in rural areas where energy costs limit access to irrigation and water supply. This has spurred the search for sustainable technologies that reduce such dependency.

A notable alternative is the Water Hammer Pump, which uses the kinetic energy of the water to pump without the need for electricity or fossil fuels. Its low cost, simplicity and ability to operate continuously, make it ideal for rural communities and areas with limited access to energy.

Beyond being a technical solution, this technology promotes environmental sustainability, reduces emissions and enhances energy autonomy. Its implementation can be extended to small communities and remote areas, contributing to the efficient use of natural resources. This thesis propose the analisis and design of this pump as a viable option to improve water supply responsibly and sustainably.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	4
DEDICATORIA	5
RESUMEN	6
TABLA DE CONTENIDO	8
ECUACIONES	10
ESQUEMAS	11
GRÁFICOS	12
IMÁGENES	13
TABLAS	14
INTRODUCCIÓN	15
Planteamiento del problema	17
Justificación de la investigación	32
Justificación socioambiental	32
Justificación técnica	33
Justificación práctica	34
Objetivos de la investigación	37
Objetivo general	37
Objetivos específicos	37
Hipótesis	37
CAPÍTULO I	38
GENERALIDADES	38
Marco teórico	39
El golpe de ariete	39
El golpe de ariete en sistemas de bombeo	42
El golpe de ariete en sistemas a gravedad	42
Bomba de Ariete Hidráulico	46
Bombas de Ariete Hidráulico con cámara de aire	46
Bomba de Ariete Hidráulico con vaso de expansión	47
Bomba de ariete sin cámara de aire	47
Características de Bomba de Ariete Hidráulico	48

Materiales.....	48
Componentes de un sistema de Bomba de Ariete Hidráulico	50
Fuente de alimentación	50
Depósito de alimentación	50
Tubería de alimentación	51
Cuerpo de la bomba	51
Zona de válvulas de impulsión	51
Válvula antirretorno	52
Cámara de aire.....	53
Válvula de aire.....	54
Tubería de elevación	54
Variables en una Bomba de Ariete Hidráulico.....	55
Caudal de alimentación	55
Caudal de entrega	55
Caudal desechado.....	55
Altura de alimentación	56
Altura de entrega	56
Desnivel de trabajo.....	56
Rendimiento de la Bomba de Ariete Hidráulico	56
Caudal de elevación	57
Ventajas y Desventajas del uso de Bomba de Ariete Hidráulico.....	57
Software Allievi.....	59
CAPÍTULO II.....	65
PROCESO DE ENSAMBLAJE Y ENSAYE DEL PROTOTIPO.....	65
Zona A Línea de alimentación y cuerpo de la bomba.....	66
Zona B Zona de válvulas de impulsión.....	67
Zona C Válvula antirretorno.....	69
Zona D Derivación de cámara de aire	71
Zona E Tubería de elevación	72
Análisis de casos en pruebas experimentales en modelo físico	76
Pruebas del prototipo	76

	10
Escenario 1	78
Escenario 2	79
Escenario 3	81
Escenario 4	82
CAPÍTULO III	84
Modelación	85
Simulación.....	91
Escenario 1	93
Escenario 2	96
Escenario 3	101
Escenario 4	106
Comparación de resultados: prototipo y modelo digital.....	111
CONCLUSIONES	113
RECOMENDACIONES	115
REFERENCIAS	116

ECUACIONES

Ecuación 1. Sobrepresión por Michaud	40
Ecuación 2. Tiempo de parada para operaciones bruscas	40
Ecuación 3. Sobrepresión por Allievi	40
Ecuación 4. Celeridad general	41
Ecuación 5. Celeridad en función de los valores del agua.....	41
Ecuación 6. Valor K en función del módulo de elasticidad.....	41
Ecuación 7. Deformación en la sección de una tubería debido a un cambio de presión.	49
Ecuación 8. Relación recomendada de L/D	51
Ecuación 9. Volumen de la cámara de aire. Fuente: Campaña y Guamán (2011)	53
Ecuación 10. Cálculo de fracción de aumento de presión en la Bomba de Ariete Hidráulico. Fuente: Campaña y Guamán (2011).....	53
Ecuación 11. Caudal desechado en sistema de Bomba de Ariete Hidráulico. Fuente: Cobos (s.f.)	55
Ecuación 12. Caudal de elevación aproximado en sistema de Bomba de Ariete Hidráulico. Fuente: Cobos (s.f.)	57

Ecuación 13. Sistema de dos ecuaciones diferenciales con dos incógnitas para conductos a presión.....	59
Ecuación 14. Sistema de dos ecuaciones algebraicas, lineales, con dos incógnitas para conductos a presión.....	59
Ecuación 15. Sistema de dos ecuaciones diferenciales con dos incógnitas para conductos a lámina libre.	60
Ecuación 16. Pendiente hidráulica.....	60

ESQUEMAS

Esquema 1 Sistema básico de bombeo. Fuente: CONUEE (2014).....	20
Esquema 2 Secuencia energética general - balance de energía. Fuente: Chavarro V (s.f.).....	20
Esquema 3 Consumo energético en un sistema de riego típico. Fuente: CONUEE (2011)	22
Esquema 4 "Economía moral y trabajo", Objetivos y Estrategias. Fuente: Gobierno de México (s.f.).....	35
Esquema 5 "Desarrollo sustentable", Objetivos y Estrategias. Fuente: Gobierno de México (s.f.)	36
Esquema 6. Símil ferroviario del movimiento ondulatorio. Fuente: Adaptación de Mendiluce (1987)	42
Esquema 7. Conducto a gravedad con sección transversal. Fuente: (Mancebo del Castillo, 1994).....	42
Esquema 8. Propagación de la onda de presión en un conducto causada por un cierre instantáneo del órgano de control. Fuente: Mancebo (1994, pág. 41)....	43
Esquema 9. Ariete Hidráulico con Cámara de Aire Fuente: Pérez (s.f.)	46
Esquema 10. Ariete Hidráulico con Vaso de Expansión Fuente: Pérez (s.f.) ...	47
Esquema 11 Ariete Hidráulico sin Cámara de Aire Fuente: Pérez (s.f.)	47
Esquema 12. Esquema de instalación de la bomba de ariete hidráulico Fuente: Adaptación de (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1997).....	48
Esquema 13. Instalación típica de una Bomba de Ariete Hidráulico. Fuente: Cobos (s.f.)	54
Esquema 14. Zona A Línea de alimentación y cuerpo de la bomba	67
Esquema 15. Zona B zona de válvulas de impulsión.....	68
Esquema 16. Zona C Válvula antirretorno	70
Esquema 17. Zona D derivación de cámara de aire	72
Esquema 18. Zona E Tubería de elevación.....	72

GRÁFICOS

Gráfico 1 Volumen concesionado para usos consuntivos, 2019 (hm ³) Fuente: CONAGUA (2022)	23
Gráfico 2 Gasto de energía eléctrica de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento en cifras Fuente: (El Colegio de México, 2019)	27
Gráfico 3 Consumo de energía en el sector agropecuario (Petajoules) Fuente: (Subsecretaría de Planeación y Transición Energética, 2025)	27
Gráfico 4 Consumo de energía en el sector agropecuario (%). Fuente: (Subsecretaría de Planeación y Transición Energética, 2025)	28
Gráfico 5. Tiempo de vaciado de depósito de alimentación en condición de válvulas de impulsión con apertura de 27%.....	92
Gráfico 6. Apertura de válvulas en función del tiempo E1	93
Gráfico 7. Envolverte de alturas piezométricas en E1.....	94
Gráfico 8. Envolverte de caudales en E1	95
Gráfico 9. Apertura de válvulas en función del tiempo E2	96
Gráfico 10. Envolverte de alturas piezométricas en E2.....	97
Gráfico 11. Envolverte de caudales en E2	98
Gráfico 12. Volumen de gas al interior del TA E2	99
Gráfico 13. Presión al interior de TA E2.....	100
Gráfico 14. Caudal de entrada y salida en TA E2.....	100
Gráfico 15. Apertura de válvulas en función del tiempo E3	101
Gráfico 16. Envolverte de alturas piezométricas en E3.....	102
Gráfico 17. Envolverte de caudales en E3	103
Gráfico 18. Volumen de gas al interior del TA E3	104
Gráfico 19. Presión al interior de TA E3.....	105
Gráfico 20. Caudal de entrada y salida en TA E3.....	105
Gráfico 21. Apertura de válvulas en función del tiempo E1	106
Gráfico 22. Envolverte de alturas piezométricas en E4.....	107
Gráfico 23. Envolverte de caudales en E4	108
Gráfico 24. Volumen de gas al interior del TA E4	109
Gráfico 25. Presión al interior de TA E4.....	110
Gráfico 26. Caudal de entrada y salida en TA E4.....	110
Gráfico 27. Curva eficiencia-volumen tanque de aire	112

IMÁGENES

Imagen 1 Proyección del consumo mundial del agua. Fuente: CONUEE (2014)	18
Imagen 2. Menú de dibujo del programa Allievi. Fuente: Universidad Politécnica de Valencia (2018)	62
Imagen 3. Configuración de la válvula de impulsión	69
Imagen 4. Conexión de las zonas A, B y C	71
Imagen 5. Conexión de las zonas D y E	73
Imagen 6. Bomba de Ariete Hidráulico con conexión disponible para un tanque de aire.	74
Imagen 7. Ficha técnica de soldadura para tubería de cobre	74
Imagen 8. Equipo de soldadura	75
Imagen 9. Tapa y tanques de aire de 10, 20 y 30 cm de longitud	75
Imagen 10. Tanque de abastecimiento a su máxima capacidad	77
Imagen 11. Bomba de Ariete Hidráulico sin tanque de aire (Escenario 1)	79
Imagen 12. Bomba de Ariete Hidráulico con tanque de aire de 10 cm (Escenario 2)	80
Imagen 13. Bomba de Ariete Hidráulico con tanque de aire de 20 cm (Escenario 3)	82
Imagen 14. Bomba de Ariete Hidráulico con tanque de aire de 30 cm (Escenario 4)	83
Imagen 15. Nodos	85
Imagen 16. Datos básicos de tubería en software Allievi	86
Imagen 17. Herramienta de cálculo de celeridad (a) en software Allievi	87
Imagen 18. Datos adicionales de tuberías en software Allievi	88
Imagen 19. Datos básicos en depósitos para software Allievi	88
Imagen 20. Datos básicos en válvula de retención para software Allievi	89
Imagen 21. Datos básicos de válvulas de regulación en software Allievi	89
Imagen 22. Datos básicos de calderín en software Allievi	90
Imagen 23. Características físicas de calderín de E4 en software Allievi	90
Imagen 24. Pérdidas de calderín en software Allievi	90
Imagen 25. Modelo del sistema Bomba de Ariete Hidráulico en software Allievi	91
Imagen 26. Resumen de incidencias en software Allievi	92
Imagen 27. Condiciones de simulación en calderín E1	93
Imagen 28. Condiciones de simulación en calderín E2	96
Imagen 29. Condiciones de simulación en calderín E3	101
Imagen 30. Condiciones de simulación en calderín E4	106

TABLAS

Tabla 1 Consumo energético por operación del suministro de agua potable. Fuente: CONUEE (2014)	19
Tabla 2 Factores que inciden en la ineficiencia energética en un riego agrícola. Fuente: CONUEE (2011)	21
Tabla 3 Clasificación de los usos del agua del REPDA 2023. Fuente: REPDA (2023)	23
Tabla 4 Usos del agua del REPDA 2023, agrupados. Fuente: REPDA (2023)	24
Tabla 5 Volúmenes de aguas Nacionales por uso del agua 2023. Fuente: REPDA (2023)	25
Tabla 6 Volúmenes de agua distribuidos por año agrícola. Fuente: CONAGUA (2024)	25
Tabla 7 Tarifas agrícolas y consumos de energía eléctrica. Fuente: (Secretaría de Energía, 2017)	26
Tabla 8 Ventas internas de energía eléctrica para tarifas agrícolas 2013-2017 (MWh). Fuente: Secretaría de Energía (2017).....	26
Tabla 9 Clasificación de tarifas. Fuente: (Comisión Federal de Electricidad, 2025)	29
Tabla 10. Valores de E y K para diferentes materiales de tuberías.	41
Tabla 11. Especificaciones de tubería de 3/4 in para diferentes materiales	49
Tabla 12. Rendimiento por relación h/H. Fuente: Cobos (s.f.)	57
Tabla 13. Tipos de elementos del programa Allievi. Fuente: Universidad Politécnica de Valencia (2018).....	61
Tabla 14. Materiales de la zona A (línea de alimentación y cuerpo de la bomba)	66
Tabla 15. Materiales de la zona B (válvulas de impulsión)	68
Tabla 16. Materiales de la zona C (válvula antirretorno).....	70
Tabla 17. Materiales utilizados en zona D (Derivación de cámara de aire)	71
Tabla 18. Materiales de la zona E (Tubería de elevación).....	73
Tabla 19. Resultados de prueba en escenario 1.....	78
Tabla 20. Resultados de prueba en escenario 2.....	80
Tabla 21. Datos de válvulas de impulsión E1	93
Tabla 22 Datos de válvulas de impulsión E2	96
Tabla 23 Datos de válvulas de impulsión E3	101
Tabla 24 Datos de válvulas de impulsión E4	106
Tabla 25. Resultados de prototipo. Fuente: propia (2025).....	111
Tabla 26. Resultados en software Allievi Fuente: propia (2025).....	111

INTRODUCCIÓN

El vínculo entre los recursos energéticos y el recurso hídrico constituye uno de los ejes fundamentales del desarrollo sostenible. La producción, distribución y consumo de energía demandan importantes volúmenes de agua, mientras que la captación, potabilización y distribución del agua dependen a su vez de un suministro constante de energía eléctrica. Esta relación de interdependencia se ha intensificado en las últimas décadas debido al incremento del consumo energético, la expansión de las actividades agrícolas e industriales y el crecimiento demográfico, que ejercen presión simultánea sobre ambos recursos.

En el contexto nacional, la mayoría de los sistemas de abastecimiento y distribución de agua utilizan equipos de bombeo que operan mediante energía eléctrica, lo que evidencia una dependencia directa del sistema hídrico respecto a la infraestructura energética. Dicha relación genera una vulnerabilidad operativa, especialmente en comunidades rurales o zonas agrícolas donde los costos eléctricos representan una limitación para el funcionamiento continuo de los sistemas de riego o abastecimiento. El aumento sostenido de las tarifas eléctricas y la inestabilidad en el suministro energético han incentivado la búsqueda de alternativas tecnológicas más eficientes y sostenibles. La relación entre energía y agua no solo implica aspectos técnicos, sino también económicos y ambientales. El incremento de la demanda energética, impulsado por la urbanización y la industrialización, ha elevado la necesidad de fuentes de generación que utilizan grandes cantidades de agua para su operación y enfriamiento. Al mismo tiempo, el proceso de tratamiento y distribución del agua requiere de energía para la operación de bombas, válvulas y sistemas de control, lo que genera un ciclo de dependencia mutua. En este escenario, la eficiencia en el uso de ambos recursos se convierte en un componente esencial para garantizar la sostenibilidad de los sistemas productivos y el bienestar de las comunidades.

En el ámbito agrícola, el consumo de agua constituye el principal uso del recurso a nivel nacional. Sin embargo, gran parte de las unidades de producción enfrentan limitaciones derivadas del alto costo energético, lo que afecta la continuidad de las actividades de riego y el mantenimiento de la infraestructura hidráulica. Esta problemática se agrava en zonas donde el acceso a fuentes de energía convencionales es limitado o económicamente inviable. En consecuencia, la adopción de tecnologías alternativas que permitan reducir la dependencia energética y aprovechar de forma más eficiente los recursos naturales representa una opción estratégica para el desarrollo rural.

Entre las tecnologías hidráulicas con potencial para responder a estas necesidades destaca la Bomba de Ariete Hidráulico. Este dispositivo aprovecha la energía cinética del agua para bombear parte del caudal hacia una cota superior sin requerir electricidad ni combustibles fósiles. Su principio de funcionamiento se basa en el fenómeno del golpe de ariete, mediante el cual la energía del flujo se transforma en energía de presión aprovechable. La simplicidad mecánica del sistema, su bajo costo de operación y mantenimiento, sumado a su capacidad para operar de manera continua, lo convierten en una alternativa viable para el abastecimiento de agua en comunidades rurales, zonas agrícolas o regiones con limitaciones energéticas.

El empleo del sistema de Bomba de Ariete Hidráulico representa no solo una alternativa técnica, sino también un aporte a la transición hacia modelos de gestión sustentable del agua y la energía. Su implementación contribuye a la reducción del consumo eléctrico y de emisiones contaminantes, al tiempo que promueve la autonomía tecnológica de los sistemas rurales. Además, el uso de energías derivadas de fuentes naturales y renovables fortalece los objetivos globales de sostenibilidad y resiliencia frente al cambio climático.

Su aplicación no se limita al ámbito rural, sino que puede extenderse a proyectos de abastecimiento en pequeñas comunidades, instalaciones de tratamiento o zonas de difícil acceso, donde la conexión a redes eléctricas resulta costosa o inviable. El diseño, dimensionamiento y evaluación del desempeño del ariete hidráulico se presentan como elementos esenciales para su correcta integración en sistemas de abastecimiento sustentables. El estudio y la aplicación de este tipo de tecnologías impulsan la creación de soluciones adaptadas a las condiciones locales, aprovechando las características hidráulicas de los entornos naturales

La investigación y experimentación en torno al funcionamiento del ariete hidráulico aportan conocimiento relevante para optimizar su rendimiento, extender su vida útil y maximizar su eficiencia hidráulica en diferentes condiciones de operación. La presente tesis se enmarca en este contexto de búsqueda de alternativas sostenibles para el abastecimiento y transporte de agua, proponiendo el análisis, diseño y evaluación de una Bomba de Ariete Hidráulico como una opción viable y ambientalmente responsable. Su desarrollo contribuye al fortalecimiento del conocimiento técnico sobre tecnologías limpias y a la promoción de prácticas orientadas al uso eficiente de los recursos hídricos y energéticos, en coherencia con los principios del desarrollo sustentable.

Planteamiento del problema

El Día del Agua del año 2014 tuvo por tema “Agua y energía”, con la intención de hacer conciencia sobre la manera tan importante en que estos dos conceptos se relacionan. Toda actividad productiva necesita estos dos insumos de manera indispensable. La agricultura, por ejemplo, demanda grandes cantidades de agua. El agua utilizada para el riego requiere de energía para ser transportada desde el lugar de captación, hasta el punto de consumo. Y la generación de energía, a su vez, requiere, en la mayoría de los casos, grandes cantidades de agua.

A excepción de tecnologías como la eólica y fotovoltaica, la gran mayoría de las plantas generadoras de electricidad dependen del vital líquido para la producción de energía. Actualmente en México, alrededor del 21% de la capacidad efectiva de generación de electricidad proviene de centrales hidroeléctricas. En marzo de 2014, esto significó una generación bruta de 3.2 gigawatts-hora.

Instituciones internacionales como la Organización de las Naciones Unidas y el Banco Mundial tienen iniciativas para promover una planeación integral de la generación de energía y gestión del agua (“Thirsty Energy” y “UN WATER” respectivamente) a fin de contribuir a un desarrollo sostenible. (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), 2014)

La relación existente entre la energía y el agua es muy grande, tanto si se habla de su producción o consumo respectivamente. Debido a esto, con el progresivo desarrollo tecnológico a nivel mundial se desencadenará un aumento en la necesidad de energía eléctrica por lo cual, con el fin de producir más de ella, también habrá un aumento directo en el consumo de agua, para el año 2035, el consumo de energía aumentará en un 50%, aumentando el consumo del agua un 85%, como se muestra en la Imagen 1.

A su vez esta energía eléctrica es utilizada para el suministro de agua potable, el abrir la llave del agua para tomar un baño o lavar trastes, implica consumo de energía. En México la gran mayoría de las viviendas cuentan con bombas centrífugas cuyo motor consume energía para llevar el agua desde las cisternas bajo el piso hasta los tinacos en la azotea de las casas y edificios. Esto forma parte del proceso de suministro de agua potable.

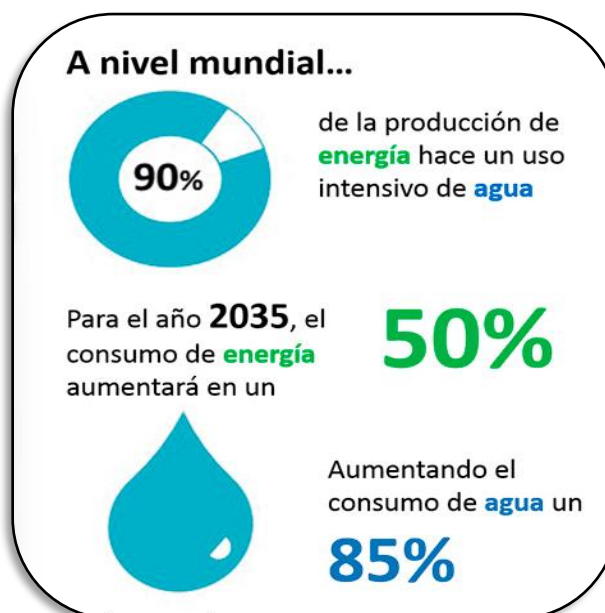


Imagen 1 Proyección del consumo mundial del agua. Fuente: CONUEE (2014)

En el proceso de suministro de agua potable generalmente existen etapas, las cuales pueden hacer uso de recurso eléctrico para su funcionamiento, estas etapas son la captación, conducción, acondicionamiento, almacenamiento y distribución.

Hablar de captación refiere al abastecimiento por medio de aguas superficiales o subterráneas. Las superficiales, son fuentes visibles como ríos o lagos, mientras que las subterráneas son fuentes confinadas en el subsuelo. La etapa de la conducción, como su nombre lo indica tiene como fin, “conducir” el recurso hídrico desde el punto de captación hasta la planta de tratamiento o el sitio de consumo, esto puede ser por medio de un canal o por medio de tuberías. Cuando la fuente no presenta un caudal suficiente para satisfacer la demanda será necesario su almacenamiento. De acuerdo con las características del agua, deberá someterse a una etapa de acondicionamiento que mediante diferentes procedimientos obtendrán las especificaciones necesarias para su consumo y así posteriormente pasar a la distribución que, por medio de estaciones de rebombeo y red de tuberías, permite la entrega del agua potable hasta el usuario final. (CONUEE, 2014)

Todos estos procedimientos tienen un diferente consumo energético principalmente de energía eléctrica. Para CONUEE (2014) un sistema de bombeo de agua potable, el consumo de energía se debe, principalmente, a cuatro variables: volumen requerido, profundidad de captación, topografía del terreno y distancia de la fuente de captación a los usuarios finales.

En la Tabla 1, se menciona el consumo aproximado en cada etapa respecto a consumo energético.

Tabla 1 Consumo energético por operación del suministro de agua potable. Fuente: CONUEE (2014)

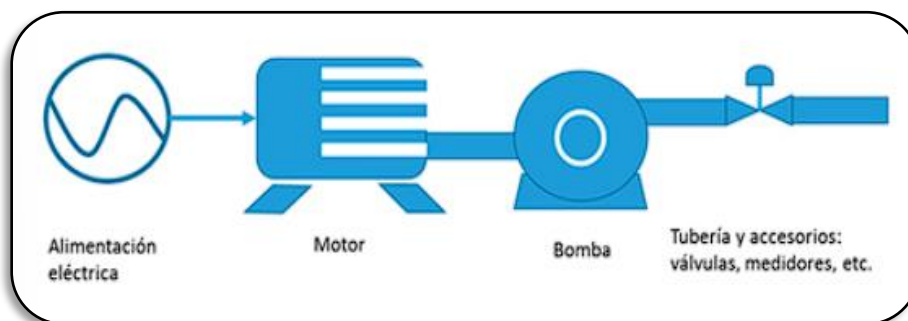
ETAPA	OPERACIÓN	EQUIPO	CONSUMO DE ENERGÍA (%)
Captación	Extracción de pozo profundo	Bombas de pozo profundo sumergibles o turbina de flecha	30-60
	Captación de fuente superficial	Bombas centrífugas horizontales o verticales	0-10
Acondicionamiento	Desinfección	Bombas de dosificación tipo pistón	1-2
	Potabilización	Bombas, ventiladores, agitadores, sopladores	5-10
Conducción	Envío del agua potable a la red de distribución	Bombas de pozo profundo sumergibles o turbina de flecha, bombas centrífugas horizontales o verticales	0-40
Distribución	Almacenamiento	No aplica	NA
	Rebombeo	Bombas centrífugas horizontales o verticales	5-35
Otras operaciones	Telemetría y control	Equipos electrónicos, sistemas de iluminación	2-3

No solo en el abastecimiento de agua potable existe la posibilidad del aprovechamiento del agua superficial y subterránea, también es posible para los diferentes usos del agua como lo es la agricultura u otros usos consuntivos. Dependiendo del sitio en el que se realice la actividad, el abastecimiento se lleva a cabo por sistemas a gravedad o por sistemas de bombeo.

Un sistema de bombeo tiene una gran área de posibilidades de aplicación dentro del abastecimiento y movimiento de agua. La definición de estos sistemas según CONUEE (2014) es la siguiente:

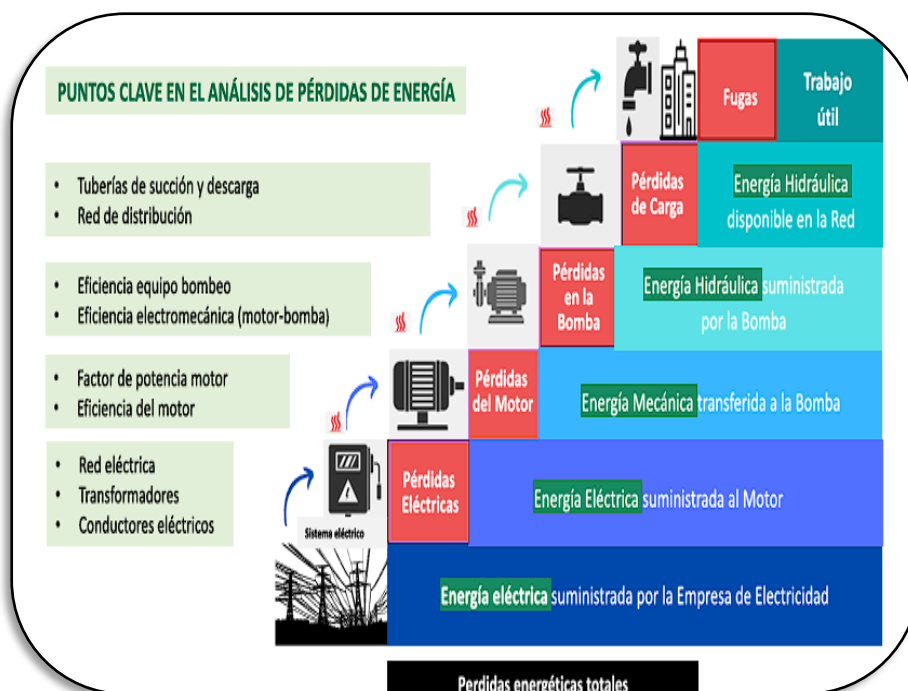
Un sistema de bombeo (Esquema 1), es el conjunto de equipos electromecánicos, sus accionamientos, transmisiones, control y alimentación de energía, como también el sistema de conducciones, válvulas, incluyendo instalaciones de succión y descarga, y otros

aditamentos, como filtros y elementos primarios de medición. Cada uno de estos elementos tiene su función, y de su adecuada selección, operación y mantenimiento depende el que se consuma más o menos energía.



Esquema 1 Sistema básico de bombeo. Fuente: CONUEE (2014)

Cuando se transforma la energía de una a otra, en un sistema de bombeo habrá pérdidas (Esquema 2), si el sistema opera de manera eficiente el rango de estas pueden estar entre el 20 y el 35%. Este rango dependerá de la potencia de la bomba, así como otros factores que aumentan el valor de pérdidas energéticas como lo son por pérdidas por fricción, fugas, incrustaciones en las tuberías, puntos de entrega muy altos, etc. La suma de todas estas deficiencias se traduce en un aumento en el consumo de energía del sistema, por ello es de gran importancia que este trabaje en su mayor eficiencia posible. (CONUEE, 2014)



Esquema 2 Secuencia energética general - balance de energía. Fuente: Chavarro V (s.f.)

La CONUEE (2011) expone algunos tipos de pérdidas que suelen presentarse en un sistema de riego agrícola los cuales contribuyen a una ineficiencia energética, algunos de ellos son un elevado número de horas de operación del sistema de riego, necesidades de una gran carga de presión en la descarga, baja calidad en las líneas de descarga y desperdicio, de agua entre otros. A continuación, en la Tabla 2 se hará mención de estos.

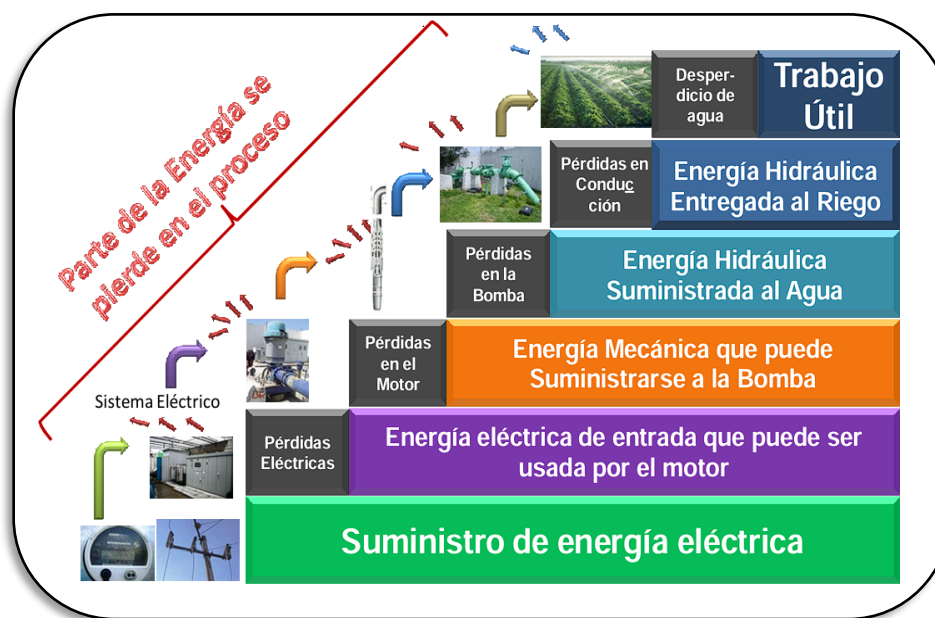
Tabla 2 Factores que inciden en la ineficiencia energética en un riego agrícola. Fuente: CONUEE (2011)

VARIABLE AFECTADA	FACTOR	RELACIÓN
Agua bombeada	El número de horas de operación del sistema de riego.	El caudal anual que se bombea y energía que se consume son directamente proporcionales a la cantidad de horas que se trabaja. Un mayor número de horas se traduce en un mayor consumo energético
Carga total	El tipo de riego usado.	La tecnificación del riego ciertamente crea la necesidad de carga de presión en la descarga de la bomba. Esta puede tener una variación desde 0 m si es a gravedad hasta los 60m.
	Necesidad de rebombeo para la aplicación del riego tecnificado.	En ocasiones, el consumo energético del rebombeo puede competir con el consumo energético para la extracción. Cuando se requieren grandes cargas de altura de 20m o más, puede ser eficiente el uso de rebombeos.
Eficiencia electromecánica	Calidad de la energía eléctrica.	Instalación inadecuada, pérdidas por sobrecalentamiento.
	Conducción del agua al cultivo.	Conducción en canales de tierra se crea infiltración del agua, en canales recubiertos evaporación y en la conducción por tubería pérdidas por fricción
	Desperdicio de agua.	Uso de agua en exceso o fuera del alcance del cultivo

Las pérdidas que hay al transformar energía eléctrica hasta energía hidráulica, también se presentan en los sistemas de bombeo para riego y si se consideran las variables presentadas en la Tabla 2, la suma de estas puede resultar en un consumo eléctrico mayor que se traduce en un mayor costo de inversión destinado a la energía

En la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) 2019, el 73.8% de las unidades de producción reportaron como principal problemática el alto costos de insumos y servicios como: energía eléctrica, mano de obra, etc. (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2020)

En una línea de transformación de energía para riego existen etapas donde cada una presenta una disminución de la energía efectiva debido a pérdidas y que no solo ocurren en los procesos intermedios como lo son la conversión eléctrica a mecánica, también en el lugar del destino por un mal aprovechamiento del agua (Esquema 3), Esto también se consideran pérdidas y con un ello un trabajo útil menor. Con ello se exhibe que, sin importar el proceso a seguir, sea abastecimiento de agua para uso doméstico o en este caso uso agrícola, no se exenta de tener pérdidas de energía. Y el hecho de hablar de la eficiencia energética y un mejor uso del recurso hídrico en el área agrícola ya que esta actividad es la que mayor uso del agua posee a nivel nacional. (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, 2011)



Esquema 3 Consumo energético en un sistema de riego típico. Fuente: CONUEE (2011)

De acuerdo con la distribución por usos consuntivos se observa que los porcentajes más altos de distribución de agua por región hidrológica administrativa corresponde a sistemas de riego cómo se observa en el Gráfico 1. (Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2022)

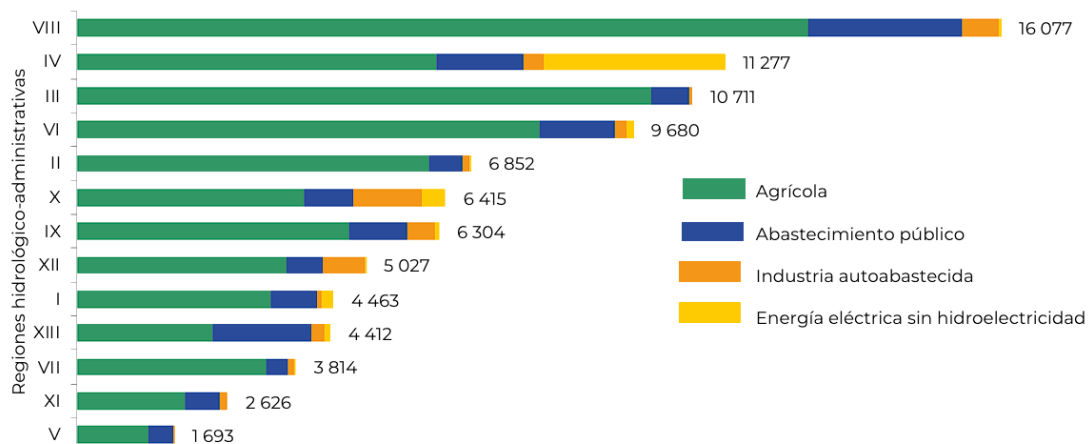


Gráfico 1 Volumen concesionado para usos consuntivos, 2019 (hm³) Fuente: CONAGUA (2022)

De los diferentes usos consuntivos que se tienen identificados en el país por el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), del total del volumen concesionado por uso consuntivo se observa en la Tabla 3 que el sector agrícola identificado con la clave (A), cuenta con un volumen concesionado de 61,308.52 hm³ seguido del sector de público urbano identificado con la clave (H) al cual corresponde un volumen concesionado de 13,465.22 hm³, siendo estos los de mayor demanda de manera independiente.

Tabla 3 Clasificación de los usos del agua del REPDA 2023. Fuente: REPDA (2023)

CLAVE	RUBRO DE CLASIFICACIÓN DEL REPDA	VOLUMEN CONCESIONADO (hm ³)
A	Agrícola (inscrito+pendiente)	61,308.52
B	Agroindustrial	3.20
C	Doméstico	37.34
D	Acuacultura	1,168.01
E	Servicios	1,408.24
F1	Industrial	2,786.91
F2	Termoeléctricas	4,035.53
G	Pecuario	247.32
H	Público urbano	13,465.22
I	Múltiples	6,168.49
K	Comercio	0.08
L	Otros	0.60
Subtotal consuntivo		90,629.46
J	Electricidad ó Hidroeléctrica	176,711.12
N	Conservación ecológica	9.46
Subtotal no consuntivo		176,720.58
Total		267,350.04

Además, el REPDA realiza una agrupación de los usos consuntivos por actividades que realizan. En la agrupación denominada agrícola, la cual reúne a los usos agrícola, acuacultura, pecuario, múltiples y otros en uno solo, con lo que el volumen correspondiente a este grupo, contrastado contra los usos de maneras individual aumenta a 68,892.95 hm³, lo cual se puede ver en la Tabla 4

Entre todos los usos consuntivos el volumen de agua extraído en su gran mayoría no es de un solo tipo de fuente, llámense superficial y subterránea. Para más de la mitad de los usos del agua, su extracción del tipo de fuente subterránea es la de mayor cantidad respecto a la de agua superficial y aún con esto, el valor de la suma del total extraído de agua subterránea para todos los tipos de uso del agua con un valor de 36.2 mil millones de m³ es menor al agua extraída de aguas superficiales únicamente para uso agrícola, con un valor de 38.5 mil millones de m³, esto se puede ver en la Tabla 5. (REPDA, 2023)

Tabla 4 Usos del agua del REPDA 2023, agrupados. Fuente: REPDA (2023)

USOS AGRUPADOS	DEFINICIÓN	VOLUMEN CONCESIONADO (hm ³)
USO AGRUPADO CONSUNTIVO		
Agrícola	A+D+G+I+L	68,892.95
Abastecimiento público	C+H	13,502.57
Industrial integrado	B+E+F1+K	4,198.44
Termoeléctricas	F2	4,035.53
Subtotal consuntivo		90,629.49
USO AGRUPADO NO CONSUNTIVO		
Hidroeléctrica	J	176,711.12
Conservación ecológica	N	9.46
Subtotal no consuntivo		176,720.58
Total		267,350.07

El agua subterránea no es el único tipo de abastecimiento que puede ser bombeado (Tabla 6), dependiendo las características de proyecto puede ser que el agua superficial no pueda llegar por sistemas de gravedad al área de aprovechamiento. En el año 2023 el sector agrícola realizó un bombeo de aguas superficiales equivalente a 324,435 miles de m³. Todos estos movimientos de agua por medio de bombeo reflejan un impacto en los costos de producción por el consumo del servicio eléctrico. (REPDA, 2023)

Tabla 5 Volúmenes de aguas Nacionales por uso del agua 2023. Fuente: REPDA (2023)

USO	AGUAS NACIONALES		
	AGUAS SUPERFICIALES	AGUAS SUBTERRÁNEAS	VOLUMEN TOTAL (m ³ /año)
	VOLUMEN DE EXTRACCIÓN (m ³ /año)	VOLUMEN DE EXTRACCIÓN (m ³ /año)	
Acuacultura	1,098,210,362	69,797,708	1,168,008,070
Agrícola inscrito	38,465,667,479	21,564,279,825	60,029,947,304
Agroindustrial	1,154,375	2,045,183	3,199,558
Comercio	-	80,000	80,000
Conservación	9,460,800	-	9,460,800
Doméstico	13,625,031	23,718,953	37,343,984
Electricidad	176,680,006,307	31,113,003	176,711,119,310
Industrial	1,519,179,411	1,267,734,516	2,786,913,927
Múltiples	2,314,903,033	3,853,589,213	6,168,492,246
Otros	300,000	304,162	604,162
Pecuario	59,105,410	188,212,225	247,317,635
Público urbano	5,915,782,956	7,549,439,254	13,465,222,210
Servicios	172,872,366	1,235,369,559	1,408,241,925
Termoeléctricas	3,654,171,474	381,357,208	4,035,528,682
TOTALES	229,904,439,004	36,167,040,809	266,071,479,813

Tabla 6 Volúmenes de agua distribuidos por año agrícola. Fuente: CONAGUA (2024)

VOLUMEN DE AGUA AGRÍCOLA (miles de m ³)	AÑO		
	2021	2022	2023
Gravedad-Presas	15,634,699	16,084,130	18,485,144
Gravedad-Derivación	6,137,209	6,580,598	6,675,946
Bombeo-Corrientes	260,381	293,814	324,435
Bombeo-Pozos	3,485,959	3,159,826	3,218,024
TOTAL GENERAL	25,518,248	26,118,368	28,703,549

(El Colegio de México, 2019) presenta que “En el año 2013, los organismos operadores reportaron un gasto total por consumo de bienes y servicios de 24,935.3 millones de pesos, de este monto, el 35.9% se destinó al pago de energía eléctrica” como resultado “...esta cifra se tradujo en un obstáculo al desarrollo de actividades para fortalecer el sector de agua potable, alcantarillado y saneamiento y mejoras.”

La Comisión Federal de Electricidad aplica distintos tipos de tarifas dependiendo el uso eléctrico al que esté destinado, hasta finales del año 2017 para identificar las tarifas agrícolas se tenía el código de “Tarifa 9” esta se dividía como se presenta en la Tabla 7

Tabla 7 Tarifas agrícolas y consumos de energía eléctrica. Fuente: (Secretaría de Energía, 2017)

TARIFA AGRÍCOLA	DESCRIPCIÓN
9	Bombeo de agua para riego agrícola (baja tensión)
9M	Bombeo de agua para riego agrícola (media tensión)
9CU	Tarifa de estímulo para bombeo de agua para riego agrícola con cargo único
9N	Tarifa de estímulo nocturna para bombeo de agua para riego agrícola

En la Tabla 8 Se hace que cada año han ido aumentando las ventas de energía eléctrica en el sector agrícola, para lograr mayor producción se utilizan más recursos. También hacer notar una caída en los valores de ventas en las tarifas 9, 9M, 9CU, 9N del año 2017 respecto al año 2016, esto corresponde a la falta de información del mes de diciembre 2017 debido al cambio de tarifas

Tabla 8 Ventas internas de energía eléctrica para tarifas agrícolas 2013-2017 (MWh). Fuente: Secretaría de Energía (2017)

TARIFA AGRÍCOLA	2013	2014	2015	2016	2017
9	41,921	27,290	33,920	46,899	11,532
9M	644,122	599,717	460,177	393,801	98,489
9CU	1,678,617	1,566,200	1,356,212	1,430,760	1,408,365
9N	7,917,532	7,834,481	8,208,455	9,456,363	9,385,795
TOTAL	10,282,192	10,027,688	10,058,764	11,327,824	10,904,181

El Gráfico 2 presenta el gasto en energía eléctrica como porcentaje de los gastos totales en consumo de bienes y servicios, el cual, para las 32 entidades federativas no es el mismo, este valor varía desde el 23.9% hasta el 71.7% del total de energía utilizada.

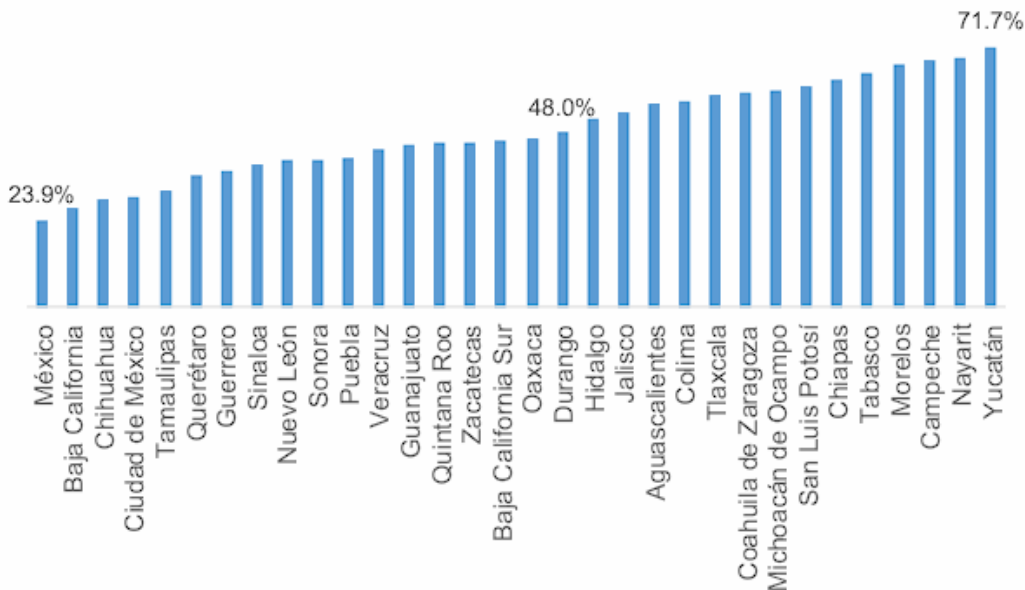


Gráfico 2 Gasto de energía eléctrica de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento en cifras Fuente: (El Colegio de México, 2019)

Desde el año 2013 se tiene registro del aumento de ventas de energía eléctrica el cual se refleja en un mayor consumo de este mismo recurso. Pero no solo consumo eléctrico ha ido en aumento, también el uso de combustibles como lo son el diésel y querosenos, como se presenta en el Gráfico 3

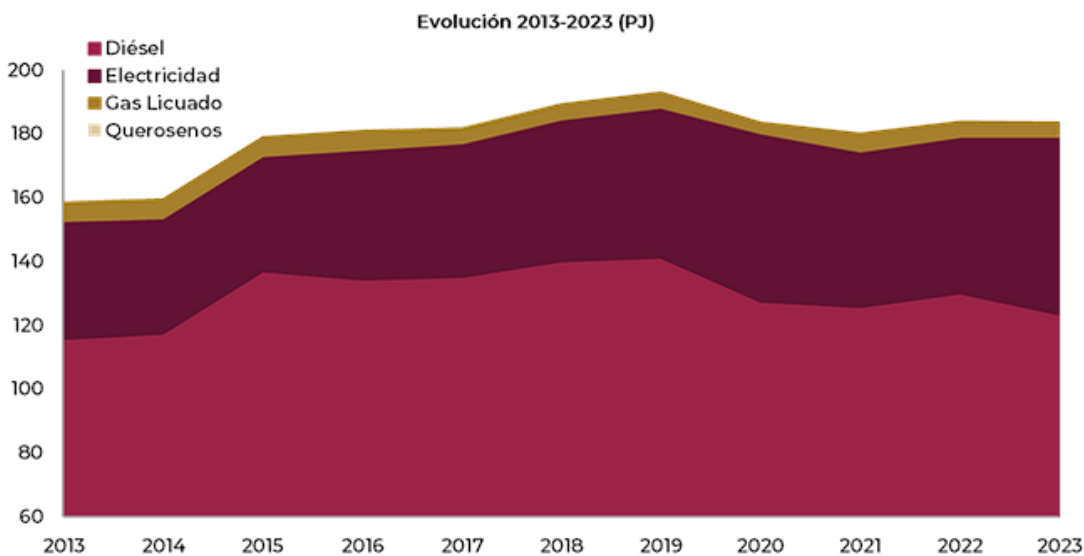


Gráfico 3 Consumo de energía en el sector agropecuario (Petajoules) Fuente: (Subsecretaría de Planeación y Transición Energética, 2025)

Del total de energía utilizada en el año 2023, el cuál fue 183.22 Petajoules, para el sector agrícola, un 30.28% fue el correspondiente a consumo eléctrico siendo este un aproximado de 55.5 Petajoules de energía. (Subsecretaría de Planeación y Transición Energética, 2025)

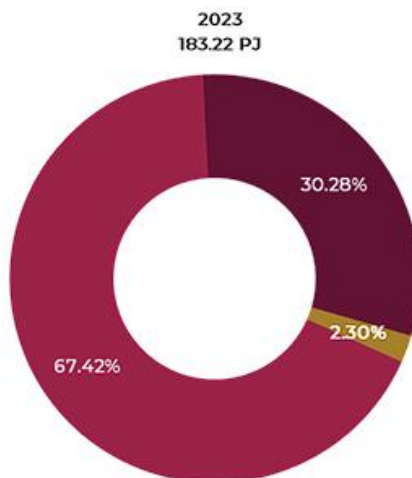


Gráfico 4 Consumo de energía en el sector agropecuario (%). Fuente: (Subsecretaría de Planeación y Transición Energética, 2025)

El Colegio de México (2019) hace un análisis de cómo ha afectado la reforma energética a la prestación de servicios de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de las aguas residuales a cargo de los municipios, que son básicos y en calidad de indispensables

El pago por el servicio de energía eléctrica reflejado en el gráfico evidencia la presión que ese rubro ejerce para las finanzas de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento municipales, como se observa, en algunas entidades federativas la factura eléctrica para extracción de agua puede representar el 71.7% de los gastos totales destinado para el consumo de bienes y servicios.

Esta situación se agrava ante el desequilibrio presupuestario por el lado de los ingresos que enfrentan estos organismos y que se asocia con la baja recaudación generada por la ausencia de tarifas justas para el cobro de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento.

Existe un nexo irrefutable entre agua y energía; sin embargo, parece que éste no ha sido considerado en las estrategias y políticas económicas del gobierno. La reforma energética modificó los artículos 25, párrafo cuarto; 27 párrafo sexto y 28 párrafo cuarto de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. De acuerdo con estas reformas, fue obligatoria la adecuación de la legislación secundaria.

La nueva Ley de la Industria Eléctrica (LIE) fue expedida con la finalidad de promover el desarrollo sustentable de la industria eléctrica que garantizara la operación continua, eficiente y segura del sistema, en beneficio de los usuarios, así como el cumplimiento de las obligaciones de servicio público y universal. La LIE clasificó a los usuarios del servicio eléctrico en: calificados y de suministro básico; los primeros, podrían participar directamente en un mercado mayorista, mientras que los segundos serían atendidos por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) que adquiriría la energía a través de subastas para garantizar los menores costos para los usuarios. La reforma energética significó la adecuación de los marcos legales en materia de energía y como consecuencia la expedición de nuevos esquemas tarifarios. Fue en este último paso con el que los Sistemas de Agua Potable y Saneamiento han visto mucho más desmejoradas sus capacidades de brindar oportunamente los servicios correspondientes.

La situación de los Sistemas de Agua Potable y Saneamiento cambió debido a la reforma energética, el esquema tarifario que derivó de la reforma energética ya no consideró la metodología tendencial que dictaba el Ejecutivo a través de la Secretaría de Hacienda y Crédito público. En sustitución, los nuevos cálculos para las tarifas tendrían como base los costos de generación que además de incluir el precio de los derivados del petróleo, incluirían los contratos legados, las compras en el mercado eléctrico mayorista y las subastas. (El Colegio de México, 2019)

Tabla 9 Clasificación de tarifas. Fuente: (Comisión Federal de Electricidad, 2025)

Categoría tarifaria	Descripción	Tarifa anterior
PDBT	Pequeña Demanda (hasta 25 kW-mes) en Baja Tensión	6
GDBT	Gran Demanda (mayor a 25 kW-mes) en Baja Tensión	6
GDMTH	Gran Demanda (mayor a 25 kW-mes) en Media Tensión Horaria	6
GDMTO	Gran Demanda (mayor a 25 kW-mes) en Media Tensión Ordinaria	6
RABT	Riego Agrícola en Baja Tensión	9, 9CU, 9N
RAMT	Riego Agrícola en Media Tensión	9M, 9CU, 9N

La nueva metodología tuvo dos propósitos: recuperar el costo de generación de la electricidad y recaudar recursos suficientes para la inversión en la red de transmisión; fuera de estos propósitos, evidentemente económicos, la nueva metodología también cargó con una serie de deficiencias desde el punto de vista social. Las tarifas buscaban “socializar” el costo de generación entre los usuarios del servicio, pero sin considerar el tipo de actividad final a la que se dedicaban, dado que, se buscaba establecer un esquema de regulación parejo que únicamente se basaba en el consumo y la ubicación de los usuarios. No considerar el tipo de actividad final a la que se dedicaban los usuarios del suministro básico de energía, provocó que la Tarifa 6: Servicio para bombeo de aguas potables o negras, de servicio público aplicada a los servicios que su nombre indica, fuese recategorizada en otras tarifas como lo son: pequeña demanda en baja tensión (PDBT), gran demanda en baja tensión (GDBT), entre otras, (Tabla 9) que incluirían otro tipo de cargos además de un cargo fijo y variable. La metodología aplicada en el nuevo esquema de tarifas violentó el principio de garantizar un servicio ininterrumpido para el sector agua potable, que, como se ha referido en la sección anterior, los organismos operadores no han podido afrontar el aumento en la factura eléctrica, que produjo la recategorización tarifaria, llegando a ser suspendidos del servicio eléctrico por saldos deudores y no pudiendo así cumplir con las tareas de distribución de agua potable y saneamiento que requieren de energía eléctrica para el bombeo y rebombeo de agua. (El Colegio de México, 2019)

La reestructuración del esquema tarifario que resultó de la puesta en marcha de la reforma energética colocó en una situación de vulnerabilidad a los Servicios de Agua Potable y Saneamiento, ajustándolos a una tarifa industrial sin posibilidad de ser modificada por ellos cuando sus necesidades lo requiriesen, como si se tratara de empresas privadas con fines de lucro, olvidando que son organismos cuya actividad principal es la prestación del servicio público de agua potable en los municipios. Los efectos negativos de la recategorización tarifaria son diversos, en algunos municipios éstos han sido más evidentes. (El Colegio de México, 2019)

Como se ha planteado con anterioridad, dependiendo de las características topográficas del predio y del tipo de fuente de abastecimiento, sea superficial o subterránea, será el tipo de sistema a utilizar. Con ello se identifica que el suministro de agua por pozos profundo conlleva regularmente al empleo de bombas sumergibles, sin embargo, al contar con un suministro por aguas superficiales, es común diseñar un canal de llamada para su desvío, por lo que su distribución depende de la topografía y puede ser por gravedad o por bombeo, siendo la propuesta en este último, el empleo de las Bombas de Ariete Hidráulico las cuales no tienen un consumo energético eléctrico y pueden bombear agua proveniente de fuentes superficiales, ya que, como se mencionó previamente, la reforma energética ha generado un impacto en los sistemas de riego incrementando los costos en el consumo de energía eléctrica.

Razón por la cual en la presente tesis se plantea el uso de la Bomba de Ariete Hidráulico que para su funcionamiento utiliza la energía hidráulica proveniente del flujo de una fuente de agua superficial, esta se canaliza por una tubería de alimentación hasta el cuerpo de dicha bomba para convertirla en energía de presión por medio de válvulas impulsoras sin la necesidad de energía eléctrica.

Actualmente no existe normativa sobre las Bombas de Ariete Hidráulico en México. La normativa vigente existente sobre el bombeo y la eficiencia energética son las siguientes:

NOM-001-ENER-2020: Eficiencia energética de bombas verticales tipo turbina con motor externo eléctrico vertical. Límites y método de prueba.

NOM-004-ENER-2014: Eficiencia energética para el conjunto motor-bomba, para bombeo de agua limpia de uso doméstico, en potencias de 0,180 kW ($\frac{1}{4}$ HP) hasta 0,750 kW (1 HP). Límites, métodos de prueba y etiquetado.

NOM-006-ENER-2015: Eficiencia energética de electromecánica para sistemas de bombeo para pozo profundo en operación. Límites y método de prueba.

NOM-010-ENER-2004: Eficiencia energética del conjunto motor bomba sumergible tipo pozo profundo. Límites y método de prueba.

NOM-032-ENER-2013: Límites máximos de potencia eléctrica para equipos y aparatos que demandan energía en espera. Métodos de prueba y etiquetado.

Justificación de la investigación

Por todo lo antes mencionado, el conducir agua de manera eficiente para abastecimiento en sistemas de riego, sin el consumo de energía eléctrica ni quema de combustibles fósiles puede parecer algo difícil de conseguir, pero una Bomba de Ariete Hidráulico puede cumplir, esto utilizando únicamente como fuente de energía, la energía hidráulica en el flujo de agua superficial. A continuación, se presentarán la justificación más detallada desde los puntos de vista sociales, ambientales, técnicos y prácticos para la presente tesis de investigación.

Justificación socioambiental

Debido al cambio climático es pertinente implementar técnicas que sean amigables con el ambiente, el uso de Bombas de Ariete Hidráulico ofrece una solución para la conducción del recurso hídrico sin la necesidad de energía eléctrica ni combustibles fósiles.

La (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018) presenta una lista de los beneficios de usar energías renovables en tres rubros: Ventajas ambientales, Ventajas económicas, Ventajas Sociales.

Ventajas	Beneficios
Ambientales	Prácticamente nula emisión de gases de efecto invernadero y contaminantes. Disminución de enfermedades causadas por contaminación Reducción de necesidad de industrias extractivas en medida de la reducción de uso de combustibles fósiles. No crean problemas de basura difíciles. Pueden reducir la necesidad de proyectos hidroeléctricos de gran escala con consecuencias de inundación y erosión.
Económicas	Reducción de tarifas en servicios de luz, agua y gas. Generación de empleos (diseñadores, fabricantes, trabajadores, instaladores) Generación de empleos indirectos (en la agricultura al expandir los sistemas de riego, ganadería, avicultura, comercios y servicios) Ayuntamientos con reducción de costo de servicios municipales de energía eléctrica
Sociales	La posibilidad de llevar energías y promoción del desarrollo a comunidades remotas.

Justificación técnica

La propuesta en la presente investigación es la Bombas de Ariete Hidráulico, para obtener datos de su comportamiento y variación de eficiencia se llevará a cabo de manera experimental, además de esto, se necesita tener un punto de referencia con el cual se puedan evaluar los resultados al modificar las dimensiones de la cámara de aire en el sistema. Para ello se hará uso de software con el cual modelar el tren de bombeo. A continuación, se presenta el manual del software a emplear

El software Allievi es un software profesional para el cálculo y simulación de transitorios hidráulico en sistemas de presión y lámina libre, dicho software fue elaborado por el ITA (Instituto Tecnológico del Agua) de la Universidad Politécnica de Valencia.

Allievi permite comprobar la efectividad de cada solución, comparando distintas alternativas para resolver el mismo problema. Se modelan diferentes escenarios, variando para una misma instalación las condiciones de funcionamiento y compara los resultados al utilizar diferentes elementos de protección.

Se busca que algo tan complejo como el golpe de ariete en sistemas hidráulicos resulte sencillo de entender y manejar.

Algunas de las razones para el empleo de Allievi se muestran a continuación:

1. Cálculo del régimen permanente con las mismas ecuaciones del método de características. Allievi calcula el régimen permanente como condiciones iniciales para la simulación del transitorio.
2. Posibilidad de la generación de escenarios de cálculo para una misma red, los cuales permiten optimizar los elementos de protección o las maniobras de regulación, mediante la comparación de resultados.
3. Incorporación de curvas de pérdidas típicas de válvulas convencionales. Posibilidad de trabajar con datos de válvulas y ventosas comerciales.
4. Incorporación del funcionamiento de régimen transitorio de válvulas automáticas con función de reductoras de presión, sostenedoras de presión y limitadoras de caudal.
5. Posibilidad de inserción de ventosas y roturas en puntos intermedios en las tuberías, sin necesidad de modificar la topología de la red.
6. Funcionamiento conjunto de canales de lámina libre y conductos a presión para simular el funcionamiento en régimen transitorio de sistemas hidráulicos combinados.

7. Simulación del funcionamiento de turbinas en instalaciones hidroeléctricas, incluyendo regulación PID en las condiciones de variación de la carga.
8. Inclusión de condiciones de contorno para simular el fenómeno de separación de columna líquida.
9. Asistente de cálculo para la celeridad, la presión de hinchado de los calderines, el momento de inercia de los grupos de bombeo, así como recursos adicionales para la entrada de datos.
10. Facilidades para simular el comportamiento en régimen transitorio de otros líquidos industriales y petroquímicos.

La licencia del programa Allievi es de carácter gratuito, además de que se encuentra esta comprobada la fiabilidad de los resultados obtenidos, lo cual permiten que el proyectista tome mejores decisiones en el diseño. Razón por la cual se empleará para corroborar la información generada de manera experimental. (Universidad Politécnica de Valencia, 2018)

Justificación práctica

Según (Comisión Nacional del Agua), aproximadamente el 61% del agua utilizada en usos consuntivos, proviene de fuentes superficiales (ríos, arroyos y lagos). El cual, en principio, es el tipo de fuente que necesita la Bomba de Ariete Hidráulico para funcionar.

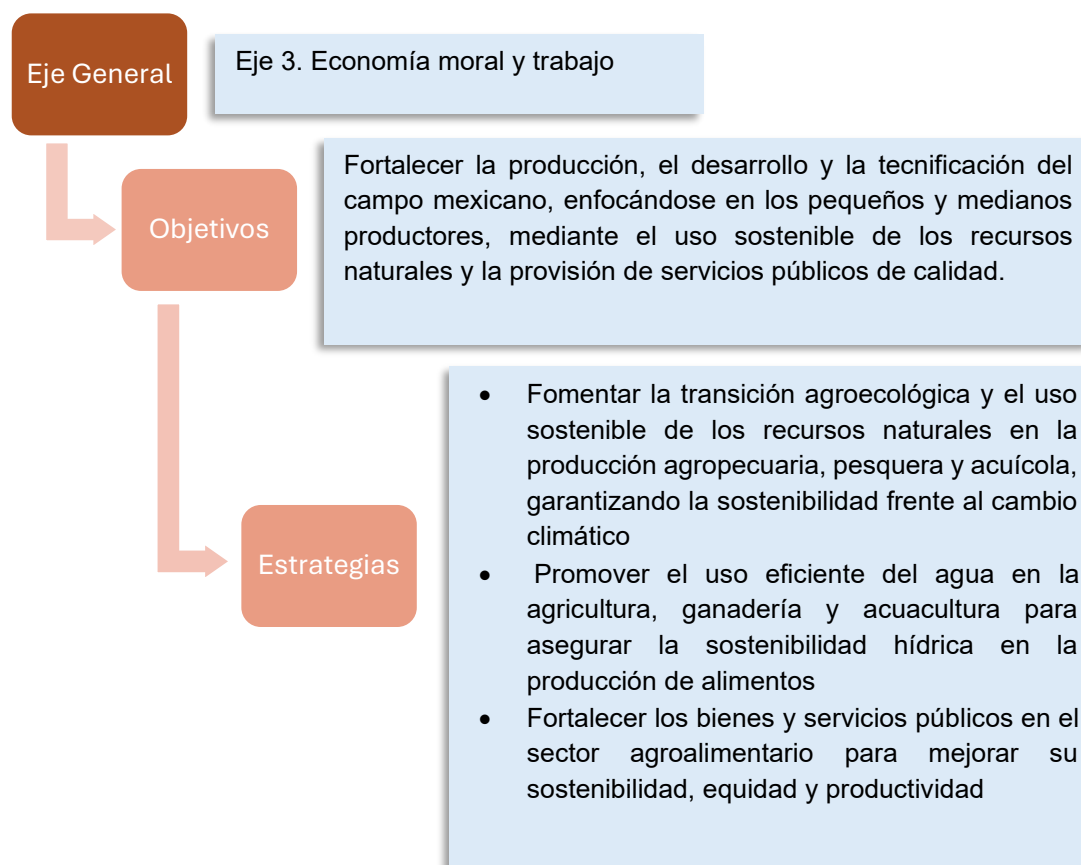
Pensando en esto, el uso de una Bomba de Ariete Hidráulico al no utilizar energía eléctrica para su funcionamiento no impacta en los gastos eléctricos en los usos que se le den.

Para México, el desarrollo, la sustentabilidad y la innovación son primordiales, esto presentado en el vigente Plan Nacional de Desarrollo (PND 2025-2030).

Dentro de compromisos a cumplir, plasmados en el Plan Nacional, se destacan dos de ellos para la presente tesis, estos abarcan el tema sobre optimización en el uso de los recursos, uno es el “Compromiso 71. Impulso a energías renovables” y el otro es el “Compromiso 98. Tecnificación de 200 mil hectáreas de riego en 13 distritos prioritarios. (Gobierno de México, s.f.)

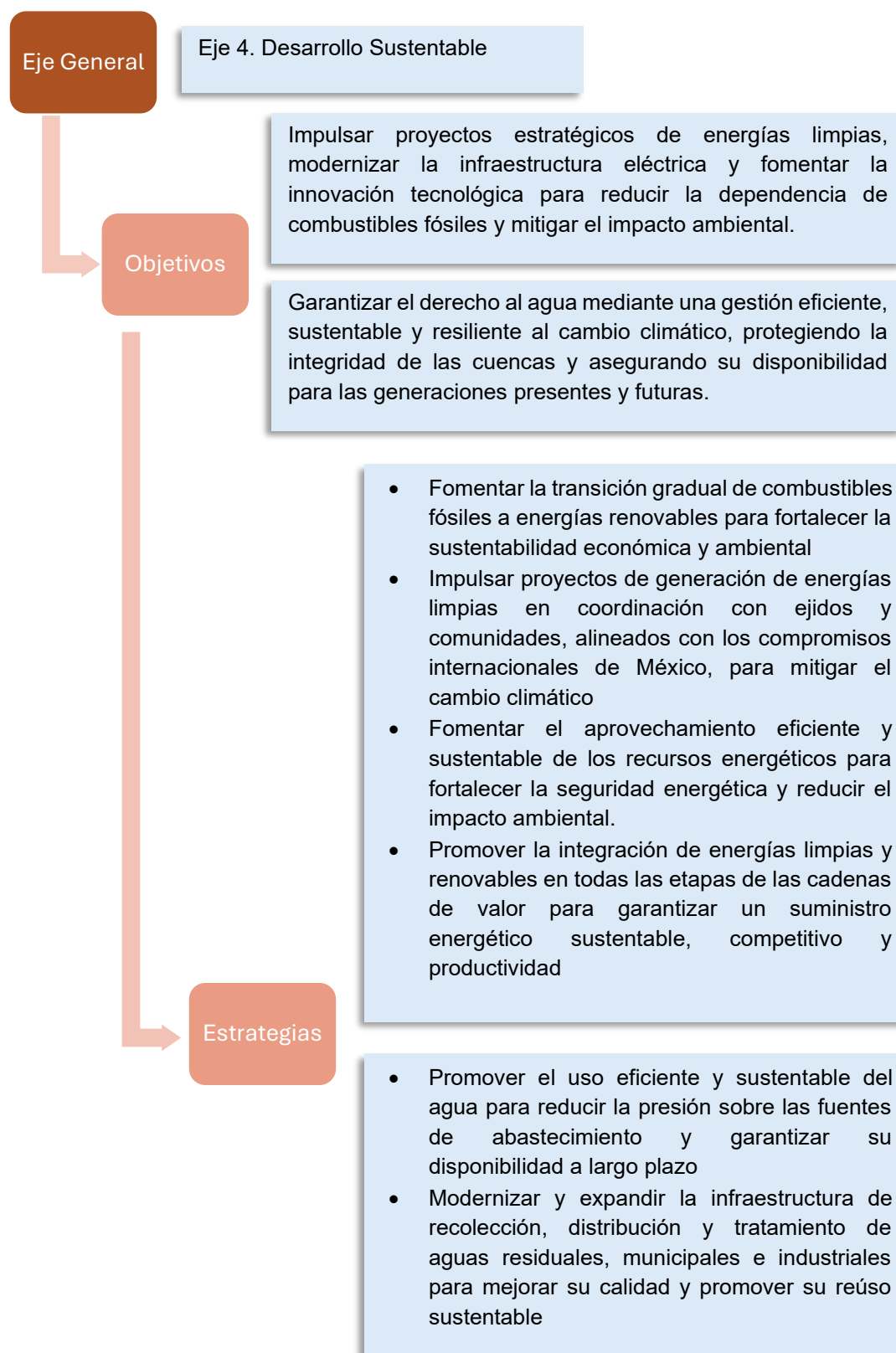
Además, el PND (2025-2030). presenta de manera desarrollada las acciones que se planean realizar durante el sexenio. La secuencia que da orden a estas ideas es la jerarquía de eje general, el cual plantea los tópicos, este dividido en objetivos los cuales son, metas dentro del rubro y estrategias que son los frentes por atacar para llegar al objetivo.

Los ejes generales están etiquetados por números. El eje 3 lleva por título “economía moral y trabajo” (Esquema 4), que toma medidas en el campo mexicano y la optimización de sus recursos no solo para una mayor producción sino también para el bienestar de sus trabajadores y beneficiados, así como el recurso hídrico. Siendo parte de ello la tecnificación del riego. (Gobierno de México, s.f.)



Esquema 4 “Economía moral y trabajo”, *Objetivos y Estrategias*. Fuente: Gobierno de México (s.f.)

Dentro del eje general 4 con título “desarrollo sustentable” (Esquema 5) presenta aún más proyectos enfatizados en energías limpias, esto repartido en dos de sus objetivos. Las principales acciones para realizar son proyectos sustentables iniciando desde la modernización de la infraestructura existente hasta la reutilización de agua para reducir el estrés hídrico para garantizar disponibilidad a largo plazo, todo esto acompañado de grandes inversiones para integración de sistemas eficientes y amigables con el ambiente. (Gobierno de México, s.f.)



Esquema 5 "Desarrollo sustentable", Objetivos y Estrategias. Fuente: Gobierno de México (s.f.)

Objetivos de la investigación

Objetivo general

Modelar el comportamiento hidráulico de una Bomba de Ariete Hidráulico con la variación de dimensiones de la cámara de aire

Objetivos específicos

- Definir el material a emplear y los accesorios necesarios para armar el tren de bombeo
- Definir las variables a modificar para identificar el comportamiento del tren de bombeo
- Realizar las observaciones del funcionamiento de la Bomba de Ariete Hidráulico de acuerdo con las diferentes variables.

Hipótesis

Los resultados obtenidos mediante la modelación en el software Allievi demostrarán que el incremento en las dimensiones de la cámara de aire en la Bomba de Ariete Hidráulico se traduce en una mejora directa de su eficiencia operativa. Este aumento de eficiencia permitirá optimizar el aprovechamiento de la energía hidráulica disponible, reduciendo la necesidad de consumo de energía eléctrica para el bombeo de agua. En consecuencia, el sistema se consolidará como una alternativa sustentable que promueve el uso eficiente de la energía y el impulso de tecnologías basadas en energías verdes.

CAPÍTULO I
GENERALIDADES

Marco teórico

Durante el movimiento o conducción de agua pueden producirse ciertas anomalías en las condiciones del sistema, estos cambios pueden ser de velocidad, presión o sección de la corriente, los cuales suceden en un determinado periodo de tiempo. A estos eventos se les denomina fenómenos transitorios o bien transitorios hidráulicos, su análisis es de suma importancia en el diseño de obras hidráulicas para evitar fallas en los sistemas de impulsión, provocadas por los drásticos cambios de presión que pueden ocasionar los transitorios.

Los aumentos de presión que ocurren debido a un transitorio hidráulico pueden ser utilizados para aumentar la presión en un sistema de conducción de agua consiguiendo así bombear el recurso, esto por medio de una Bomba de Ariete Hidráulico la cual, como su nombre lo sugiere, funciona gracias al fenómeno transitorio llamado conocido como golpe de ariete.

El golpe de ariete

Es un fenómeno de onda creado por cambios repentinos en la velocidad de un líquido, este puede estar directamente relacionado con la compresibilidad de dicho líquido. (Martin, 2008)

En el área de la hidráulica el fenómeno de golpe de ariete se puede presentar en conductos cerrados o bien tuberías, si el agua que conduce se desplaza a una determinada velocidad y se corta el flujo de manera abrupta, por cualquier medio, generando una presión excedente o también llamada sobrepresión. Esta sobrepresión en estudios se ha visto que incluso puede ser más de 17 veces la presión inicial. (Cobos, s.f.)

Mendiluce (1987), presenta un ejemplo para visualizar e interpretar el principio de este fenómeno:

Los pasajeros de pie en un autobús, si este frena de manera repentina, la inercia los hará desplazarse hasta el frente del autobús, lo cual tendrá como consecuencia que el pasajero más próximo al frente sea presionado por el segundo y así consecutivamente, esto, de manera similar, es lo que sucede con el agua dentro de la tubería, la compresión se presenta en la zona más cercana a la válvula trasladándose al agua que le precede hasta la zona de origen. Después, al agotarse la energía cinética, se inicia un proceso de descompresión en el origen de la conducción trasladándose hacia la válvula sobrepasando el punto de equilibrio.

Entonces, “el cierre de una válvula produce una onda de presión que, desplazándose desde la válvula accionada hacia el origen, se transforma en depresión, que retrocede hasta la válvula para volver a reflejarse y transformándose en compresión, repitiendo el ciclo”. (pág. 3).

Existen dos fórmulas para calcular la sobrepresión generada por el golpe de ariete, la de Michaud y la de Allievi.

Michaud estableció su fórmula para el cálculo de esta sobrepresión:

$$\Delta H = \frac{2 L V}{g T}$$

Ecuación 1. Sobrepresión por Michaud

Mientras que Allievi establecía su teoría general del Golpe de Ariete, demostrando que cuando existen operaciones bruscas, es decir cuando

$$T < \frac{2 L}{a}$$

Ecuación 2. Tiempo de parada para operaciones bruscas

el valor de la sobrepresión es independiente de la longitud y toma el valor:

$$\Delta H = \frac{a V}{g}$$

Ecuación 3. Sobrepresión por Allievi

Como recomiendan los tratados de la hidráulica, se utilizarán estas 2 fórmulas de la siguiente manera

Cuando $T > \frac{2L}{a}$ fórmula Michaud

Cuando $T < \frac{2L}{a}$ fórmula Allievi

Donde:

ΔH ; Sobrepresión del golpe de ariete, m

L; Longitud de la impulsión, m

V; Velocidad del agua, m/s

g; Valor de la gravedad = 9.81 m/s²

a; Celeridad, m/s²

T; Tiempo de parada, s

Q; Caudal, m³/s

Para utilizar las fórmulas debemos conocer el valor de la celeridad (a), que se define como la velocidad de propagación de las ondas de presión, contenida en la tubería, para ello Allievi presenta la siguiente expresión:

$$a = \sqrt{\frac{1}{\frac{\omega}{g} \left(\frac{D}{E e} + \frac{1}{\varepsilon} \right)}}$$

Ecuación 4. Celeridad general

ω ; peso específico del fluido, kg/m^3

D; Diámetro de la tubería, m

ε ; Módulo de elasticidad del fluido, kg/m^2

E; Módulo de elasticidad del material constitutivo de la tubería, kgf/m^2

e; Espesor de la tubería, m

Sustituyendo los valores de peso específico y módulo de elasticidad del fluido por los valores correspondientes del agua. Siendo $\omega = 1000 \text{ kg/m}^3$ y $\varepsilon = 2.07 \cdot 10^8 \text{ kg/m}^2$ se obtiene otra expresión más sencilla

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + K \frac{D}{e}}}$$

Ecuación 5. Celeridad en función de los valores del agua

En la que el valor K depende del módulo de elasticidad correspondiente al material de la tubería, se presentan algunos en la Tabla 10, siendo:

$$K = \frac{10^{10}}{E}$$

Ecuación 6. Valor K en función del módulo de elasticidad

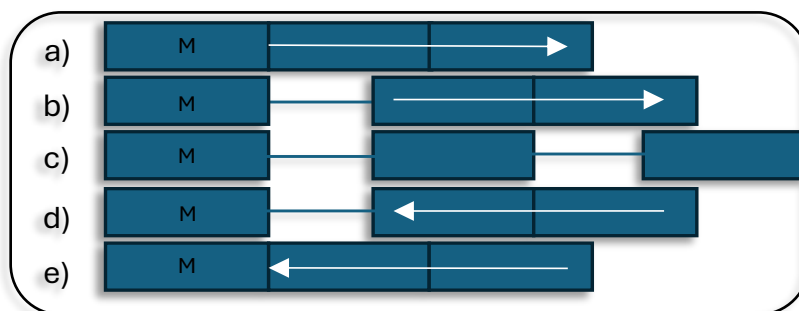
Tabla 10. Valores de E y K para diferentes materiales de tuberías.

Material	E Módulo de elasticidad (kgf/cm^2)	K (m^2/kg)
Acero	2,000,000	0.5
Cobre	1,100,000	0.91
Aluminio	700,000	1.43
PVC	30,000	33.33
CPVC	26,000	38.46
Polietileno de alta densidad	9,000	111.11

El golpe de ariete en sistemas de bombeo

Al igual que el golpe de ariete se produce por un cierre de válvula repentino, se puede producir al detenerse bruscamente una bomba en un sistema impulsado, pero en sentido contrario. (Mendiluce, 1987, pág. 3)

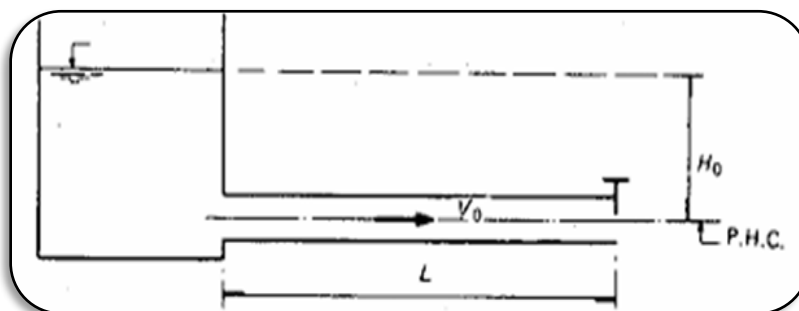
El Esquema 6 representa varios instantes el símil de un tren en parada cuya locomotora (M) empuja dos vagones (cuadriláteros), sus enganches (líneas entre vagones), tienen cierta holgura que representa la compresibilidad del agua. El instante a) representa el régimen de empuje en el que la compresión de los enganches aproxima los vagones. El instante b) la locomotora se ha detenido y el enganche del primer vagón se ha tensado al máximo y a continuación el del segundo, c) hasta alcanzar su máximo y continuar el proceso inverso hasta terminar en e). (Mendiluce, 1987, pág. 4)



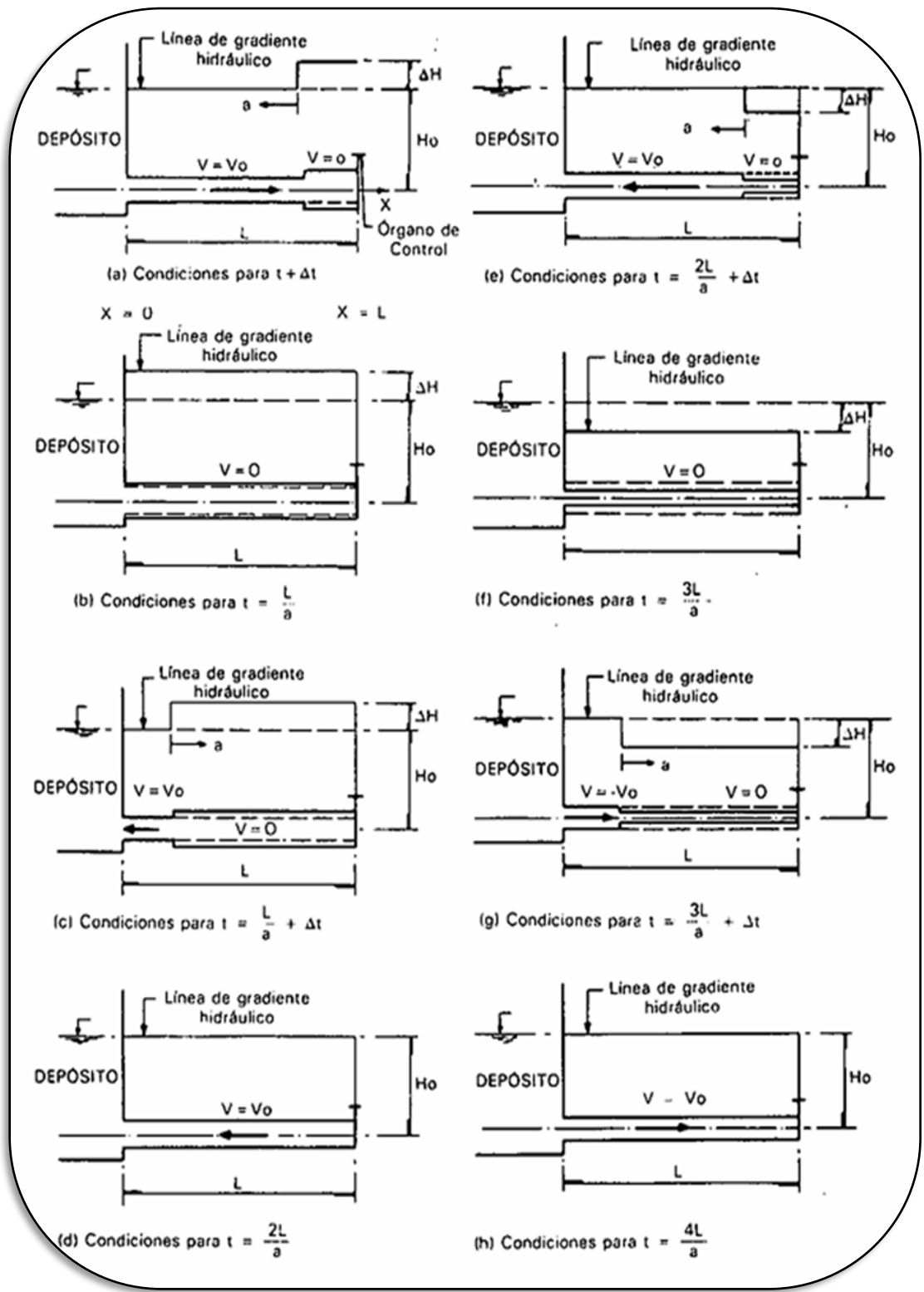
Esquema 6. Símil ferroviario del movimiento ondulatorio. Fuente: Adaptación de Mendiluce (1987)

El golpe de ariete en sistemas a gravedad

A diferencia de los sistemas de impulsión, en los sistemas a gravedad, la causa del fenómeno de golpe de ariete es debido a las maniobras de control de flujo. Para Mancebo (1994), las perturbaciones mediante maniobras de cierre o apertura por medio de válvulas o compuertas dan origen al fenómeno tránsito conocido como golpe de ariete. (pág. 39)



Esquema 7. Conducto a gravedad con sección transversal. Fuente: (Mancebo del Castillo, 1994)



Esquema 8. Propagación de la onda de presión en un conducto causada por un cierre instantáneo del órgano de control. Fuente: Mancebo (1994, pág. 41)

Mancebo (1994), presenta de manera gráfica lo que sucede durante el fenómeno de golpe de ariete para el caso de una conducción a gravedad. donde se puede considerar una sección como en el Esquema 7 en la que se encuentra un conducto de longitud L , alimentado por un depósito con una superficie libre con un nivel constante de agua, así mismo, aguas abajo se encuentra un dispositivo de cierre en el instante $t = 0$. (pág. 40)

Suponiendo que el cierre es de manera instantánea, la energía cinética en el conducto se transformará en energía potencial, la cual aumentará la carga piezométrica original, causando un trabajo de deformación en las paredes del conducto y el agua. Esta conversión de energía constituye una onda de presión positiva que se propaga aguas arriba a una determinada velocidad o celeridad a .

Dicha onda modifica las condiciones iniciales del conducto; deformación en las paredes de este, compresión en el agua; aumentando su densidad y la velocidad en la zona se reduce a cero. Aguas abajo del frente de la onda (sentido contrario a la inicial), el conducto, el agua, la carga piezométrica y velocidad de flujo permanecen con sus condiciones iniciales (Esquema 8.a). (Mancebo del Castillo, 1994, pág. 40)

Cuando el frente de onda llega al depósito en un tiempo $t=L/a$, en este punto todo el conducto se encuentra deformado, la velocidad de flujo es igual a cero, la carga piezométrica aumenta y el agua se encuentra comprimida. (Esquema 8.b)

Debido a que el depósito tiene la condición permanecer con nivel constante, no hay modificaciones de ningún tipo, en esta forma el depósito disipa totalmente la onda de presión y en este instante se produce la traslación de una onda negativa hacia el dispositivo de parada, (Esquema 8.c), ocasionando que aguas abajo del frente de la onda el agua fluya hacia el depósito con una velocidad idéntica en magnitud a la inicial, empezando una etapa donde el conducto y el agua adquieran sus propiedades iniciales en esta región, para cuando la onda llegue al dispositivo de cierre en un instante $t=2*L/a$, tanto el conducto como el agua en este hayan regresado a su estado original, pero con escurrimiento desde el dispositivo de cierre hacia el depósito (Esquema 8.d). (Mancebo del Castillo, 1994, págs. 40-41)

Esta serie de eventos se le conoce como “fase directa del golpe de ariete”, el cual consiste en la formación de un frente de onda positivo; que viaja desde el cierre hasta el depósito y un frente de onda negativo que viaja en sentido contrario.

Debido a esta fase, se origina una serie de eventos, el flujo de agua en dirección al depósito origina; caída de la carga, contracción en las paredes del conducto hasta dimensiones inferiores a las iniciales y una reducción a cero de la velocidad

en la zona aguas abajo del frente de onda negativa, que sigue en dirección al depósito (Esquema 8.e), cuando llega el instante $t=3L/a$ el conducto se encuentra contraído en su totalidad, no hay velocidad en el agua y su densidad es mayor que la original (Esquema 8.f)

A partir de este momento el depósito funciona nuevamente como reflejando una onda positiva, volviendo el conducto a su estado inicial desde aguas arriba iniciando un escurrimiento con velocidad igual a la inicial en dirección al dispositivo de cierre (Esquema 8.g) y para el momento $t=4L/a$, el conducto vuelve a tener todas sus características igual a las originales (Esquema 8.h). Esta segunda etapa se llama “fase inversa del golpe de ariete” y al igual que la primera etapa tiene un periodo $T=2L/a$. (Mancebo del Castillo, 1994, pág. 42)

Sistema de bombeo

Los sistemas de bombeo son los responsables de mover grandes volúmenes de agua para distintos usos. Funcionan por medio de la aplicación de fuerza mecánica, esto para elevar y transportar el agua de un punto a otro. Son esenciales tanto en plantas de tratamiento como en sistemas de abastecimiento. (Aqua Systems, 2023)

En los sistemas de bombeo se utilizan equipos generalmente electromecánicos con el cual se adiciona energía de presión y con ello se logra bombear el agua. Para CONAGUA (2019) un equipo de bombeo consiste en dos elementos, una bomba y un accionador. El accionador entrega energía mecánica y la bomba la convierte en energía cinética que un fluido adquiere en forma de presión, de posición y de velocidad.

Un criterio básico que incluye la clasificación es el principio por el cual se adiciona energía al fluido. Bajo este criterio se clasifican en dos grandes grupos, dinámicas, las cuales son bombas a las que se agrega energía continuamente y de desplazamiento positivo, que son bombas en las cuales se agrega energía continuamente. La primera, entrega un flujo constante con una presión suficiente y la segunda, entrega un flujo en intervalos y pueden alcanzar altas presiones. (Comisión Nacional del Agua, 2019)

Dentro del grupo de bombas de desplazamiento positivo podemos encontrar las Bombas de Ariete Hidráulico, las cuales están diseñadas para provocar reiteradamente el golpe de ariete, y con la energía resultante realizar el impulso de agua a un nivel más alto compensando la altura elevada con un caudal desechado. (Zerna Quinteros, s.f.)

Bomba de Ariete Hidráulico

La Bomba de Ariete Hidráulico, según el (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1997), es un dispositivo mecánico que sirve para elevar agua utilizando la energía potencial de una caída, para bombear una porción del gasto que la alimenta. Este equipo funciona por medio del fenómeno del golpe de ariete el cual es producido por una interrupción del flujo de un fluido en movimiento y consiste en la transformación de la energía cinética en energía de presión

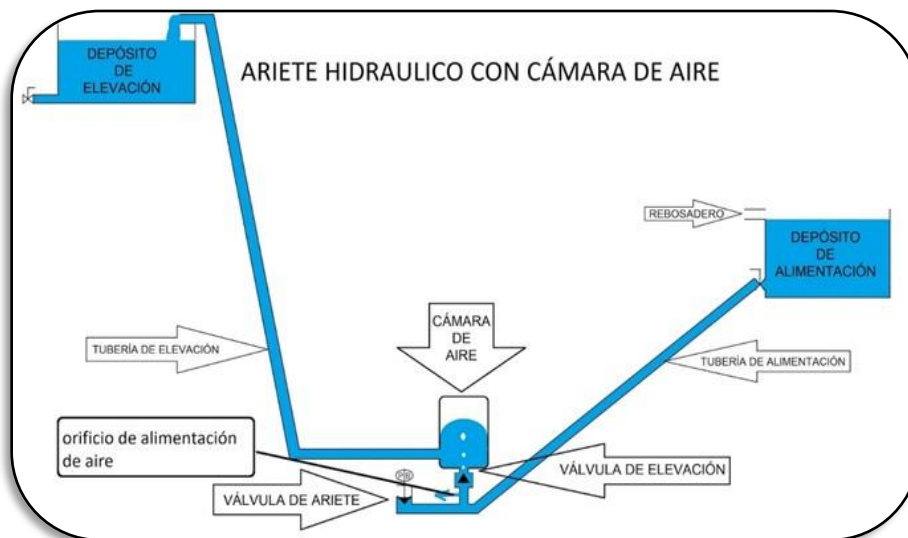
La Bomba de Ariete Hidráulico se clasifica en 3 grupos, los cuales son:

- Con cámara de aire
- Con vaso de expansión
- Sin cámara de aire

A continuación, se describirá cada uno de ellos.

Bombas de Ariete Hidráulico con cámara de aire.

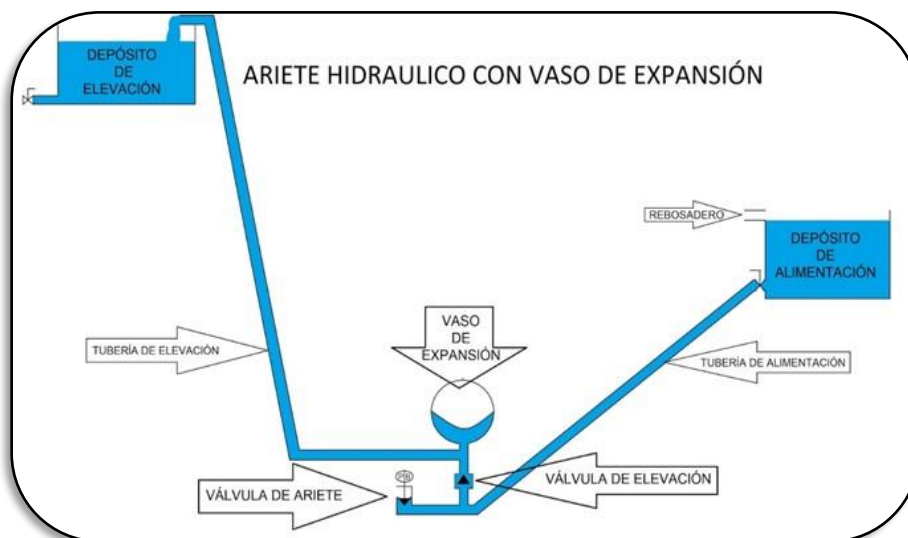
La peculiaridad de esta bomba de ariete hidráulico es que el agua está en contacto con el aire en la cámara de aire o vaso de expansión sin membrana que está en posición vertical y se une al cuerpo de válvulas mediante la válvula de elevación que también está en vertical, la cámara de aire absorbe los golpes de ariete y trasforma el caudal de elevación de agua pulsante a un caudal de agua más continuo. (Pérez, s.f.) (Esquema 9)



Esquema 9. Ariete Hidráulico con Cámara de Aire Fuente: Pérez (s.f.)

Bomba de Ariete Hidráulico con vaso de expansión.

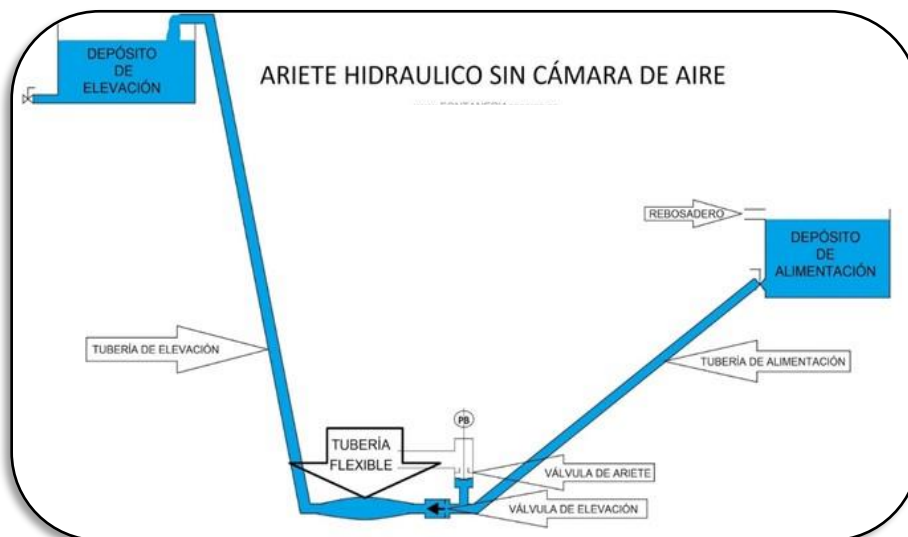
Es prácticamente igual a la Bomba de Ariete Hidráulico con cámara de aire la única diferencia es el vaso de expansión con membrana, el agua no está en contacto con el aire. (Pérez, s.f.) (Esquema 10)



Esquema 10. Ariete Hidráulico con Vaso de Expansión Fuente: Pérez (s.f.)

Bomba de ariete sin cámara de aire.

Esta Bomba de Ariete Hidráulico utiliza una tubería flexible de goma con la función de absorber los impactos de los golpes de ariete y convertir el caudal de agua pulsante en caudal de agua continuo. (Pérez, s.f.) (Esquema 11)

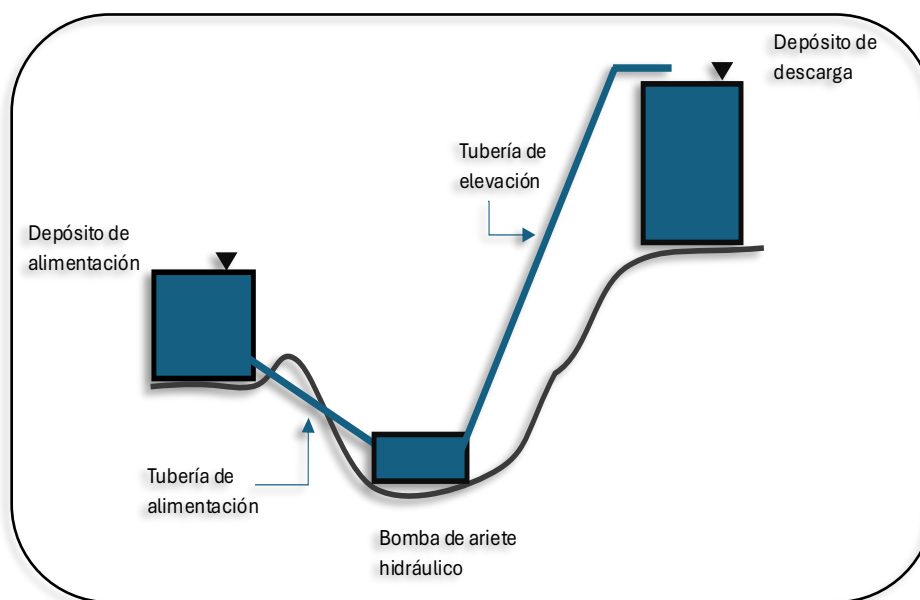


Esquema 11 Ariete Hidráulico sin Cámara de Aire Fuente: Pérez (s.f.)

Características de Bomba de Ariete Hidráulico

La Bomba de Ariete Hidráulico se construye de forma relativamente sencilla, lo que permite se pueda elaborar en un taller de herrería e incluso hacerlo con material de plomería de manera económica. (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1997, pág. 101). Debido a que el golpe de ariete es el fundamento para el funcionamiento de esta bomba, el uso de diferentes materiales puede alterar la eficiencia del golpe de ariete, debido a que ese se ve relacionado con la capacidad de las paredes de la tubería en disipar la energía de la sobrepresión por medio de deformaciones en la misma.

Existen ciertas condiciones para garantizar un adecuado funcionamiento de la Bomba de Ariete Hidráulico, las cuales son: una caída de agua de por lo menos un metro de altura que debe medirse entre el depósito de alimentación y la bomba, un gasto constante en la fuente de alimentación y una tubería con descarga a un depósito donde se almacene el agua bombeada como se observa en el Esquema 12. (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1997)



Esquema 12. Esquema de instalación de la bomba de ariete hidráulico Fuente: Adaptación de (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1997)

Materiales

Para la elaboración de la Bomba de Ariete Hidráulico se puede usar una gran variedad de materiales, estos pueden ser desde tuberías de CPVC hasta tuberías de acero galvanizado.

La elección del material depende de las condiciones de diseño que se tengan, las características que se consideran generalmente son: la resistencia a la presión, resistencia a la deformación, rugosidad.

Debido a que la energía del golpe de ariete se puede convertir en deformación y calor por medio de una correcta elección de material se busca enfocar la energía en bombear agua en el sistema de la Bomba de Ariete Hidráulico. Sin embargo, materiales con poca resistencia a la presión, deformación y muy alta rugosidad pueden ser utilizados, pero presentan menor eficiencia.

Tabla 11. Especificaciones de tubería de 3/4 in para diferentes materiales

Material	Presión resistente (mca)	Coefficiente de rugosidad de Manning
Acero galvanizado	33,753	0.015-0.017
Cobre	2,313	0.009-0.012
CPVC	281	0.009-0.010

Para el caso de estudio no se excederá el espectro de los 50 mca de presión en el sistema lo cual se puede cubrir tanto como con la tubería de CPVC como con la tubería de cobre y acero galvanizado cuyas resistencias a la presión están presentadas en la Tabla 11.

En el caso de la resistencia a la deformación depende tanto del módulo de elasticidad como del espesor de las paredes de la tubería y como se presenta en la Tabla 10 el CPVC tiene valores muy por debajo del acero y el cobre, con esa diferencia y contrastando que el valor E en la Ecuación 7 es inversamente proporcional al valor de la deformación resultando en una deformación mayor del CPVC para condiciones similares que el acero o el cobre por lo que se descarta debido a que se busca una mayor resistencia a la deformación.

$$dA = \frac{A D}{e E} (dp)$$

Ecuación 7. Deformación en la sección de una tubería debido a un cambio de presión.

Donde:

dA; Deformación del área, mm²

A; Área interior de la tubería, mm²

D; Diámetro interior de la tubería, mm

e; espesor de las paredes de la tubería, mm

E; Módulo de elasticidad, kgf/cm²

dp; Diferencia de presión, kgf/cm²

Al hacer un análisis por el formato de suministro de las tuberías de acero y cobre, la tubería de cobre presenta longitudes más adecuadas para su trabajabilidad siendo posible la adquisición de menos de 2 m de longitud para no tener desperdicio, además de hacer uniones por medio de soldadura 50/50 y seccionamientos más fácilmente para los componentes necesarios en la bomba, comparado con los 3.5 m mínimos de una tubería de acero con una trabajabilidad limitada.

Por lo que, para las condiciones del caso de estudio, la tubería de cobre tipo M de nacobre será suficiente para garantizar un funcionamiento adecuado al realizar con esta, el cuerpo del prototipo de Bomba de Ariete Hidráulico. Además de garantizar resistencia a la corrosión, oxidación, químicos y detergentes fuertes, al igual que la eliminación de hongos, bacterias y virus.

Componentes de un sistema de Bomba de Ariete Hidráulico

La configuración del tren de bombeo se integra por componentes de alimentación, componentes de la Bomba de Ariete Hidráulico y sus componentes de descarga, los cuales se presentan a continuación de acuerdo con el orden de la secuencia operativa en que se disponen desde el inicio hasta el final del sistema.

Fuente de alimentación

Para el abastecimiento de una Bomba de Ariete Hidráulico puede haber varios tipos de fuentes, en su totalidad deberán ser de aguas superficiales, puede ser de manantiales, canales, ríos, etc.

Dependiendo de la captación habrá que tomar medidas para garantizar que el agua llegue limpia y por gravedad al depósito por el cual se hará entrega del caudal de alimentación a la Bomba de Ariete Hidráulico. Estas medidas pueden ser con un simple filtro si el agua emana limpia como en un manantial o hasta decantadores o desarenadores para eliminar partículas más pesadas. (Pérez, s.f.)

Depósito de alimentación

El depósito del ariete hidráulico podrá ser de cualquier tipo de material mientras pueda mantener una condición impermeable. Deberá ubicarse lo más cercano a los filtros de agua. Este almacenará y mantendrá el agua limpia proveída por la fuente de alimentación. El depósito también deberá mantenerse siempre lleno, evitando la entrada de aire para un mejor funcionamiento (Campaña y Guamán, 2011)

Tubería de alimentación

Es aquí donde genera la energía cinética que se utilizará en la bomba para la elevación del agua. Lo ideal es que se utilice un material con un con un módulo de elasticidad bajo, para que la tubería no absorba los impactos de las ondas de presión y succión y se pueda transmitir toda la energía a la válvula antirretorno (Pérez, s.f.)

$$150 \leq \left(\frac{L}{D}\right) \leq 1000$$

Ecuación 8. Relación recomendada de L/D

La longitud de la tubería de alimentación recomendada se encuentra en los límites mostrados en la Ecuación 8, la cual se refiere a una longitud de 150 a 1000 veces la del diámetro de tubería.

Si la tubería es muy corta se provoca un cierre temprano de la válvula, lo cual no permite un aumento de presión adecuado. Si la tubería es muy larga las pérdidas por fricción reducirán la capacidad de la bomba. (Campaña y Guamán, 2011)

Existen 2 tipos de configuraciones de llegada de la tubería de alimentación al cuerpo de la bomba: Configuración con ampliación a la llegada y la configuración manteniendo el mismo diámetro de la tubería de alimentación y en el cuerpo de la bomba y hacer una ampliación hasta la válvula de impulsión.

Las recomendaciones según (Cobos, s.f.) son que el ángulo de la tubería se encuentre entre 10° y 45° aunque también se puede con ángulos de 90°. Además de usar una configuración de llegada de tubería de alimentación al cuerpo de la bomba manteniendo el mismo diámetro en ambas y hacer ampliación hasta la válvula de impulsión, ya que esta presenta mejor eficiencia.

Cuerpo de la bomba

El cuerpo es básicamente toda parte que por medio de conexiones y accesorios tipo codo y tee, unen la tubería de alimentación, la zona de válvulas de impulsión y la válvula antirretorno, esta generalmente está hecha de tubería del mismo material

Zona de válvulas de impulsión

Esta zona válvula es una de las partes más importantes de una Bomba de Ariete Hidráulico ya que en esta, es donde se generará el fenómeno transitorio del golpe de ariete, causando una sobrepresión que permitirá al sistema bombear agua. Esta zona puede ser conformada por una única válvula de impulso o hasta tres de ellas.

La válvula de impulsión es la parte de la Bomba de Ariete Hidráulico donde se deja pasar una parte del caudal de alimentación y por medio de cierres abruptos o casi instantáneos, genera una sobrepresión que recorre el cuerpo de la Bomba de Ariete Hidráulico, permitiendo abrir la válvula antirretorno y así dejando pasar el agua por ésta, consiguiendo así elevarla. Estos cierres se realizan de manera periódica y automática, por lo que se recomienda usar materiales resistentes a la fatiga, para con ello garantizar un funcionamiento eficiente y reducir el mantenimiento de la pieza.

La cantidad de válvulas de impulsión no es equivalente a la elevación que puede generar, pero se recomienda usar más válvulas en casos donde la descarga sea muy elevada para repartir el peso de cada válvula y alcanzar la misma energía en el golpe de ariete. La cantidad máxima que puede haber son tres en una Bomba de Ariete Hidráulico, en este caso se podrán utilizar válvulas con diámetros iguales al de la tubería del cuerpo de la bomba. En caso de tener una cantidad menor a 3 válvulas, la válvula deberá tener una ampliación de diámetro con respecto al diámetro de la tubería del cuerpo de la bomba. (Cobos, s.f.)

Campana y Guamán (2011), presentan los diferentes tipos de válvulas de impulsión que existen, estas son:

- Válvulas de resorte de pletina
- Válvulas con plato perforado
- Válvulas reguladas por resorte
- Válvulas con pesas por debajo
- Válvulas con pesas por encima.

Para la elaboración de la Bomba de Ariete Hidráulico en la presente tesis, la zona de válvulas de impulsión se elaborará con 3 válvulas del tipo “con pesas por encima” para mantener el diámetro de tubería del cuerpo de la bomba.

Válvula antirretorno

El propósito de esta pieza, como su nombre lo indica, es el de no dejar regresar el agua bombeada, su mayoría del tiempo debe permanecer cerrada y solo abrirse para el paso del agua debido a la sobrepresión de la zona de válvulas de impulsión. Esta válvula solo debe permitir el flujo de agua en un sentido, el cual debe ser desde el cuerpo de la bomba hacia la cámara de aire y la tubería de elevación.

Para la Bomba de Ariete Hidráulico se utilizará un check de retención universal el cual por medio de un resorte la mantiene cerrada en todo momento hasta que

la presión del agua sea mayor en el cuerpo de la válvula que la ejercida por la tubería de elevación y la cámara de aire.

Cámara de aire

La cámara de aire se encuentra por encima de la válvula antirretorno. Consiste en un depósito de aire que ayuda a proporcionar un caudal constante en vez de hacerlo de manera intermitente, así como lo es el golpe de ariete producido en la zona de impulsión.

El funcionamiento de la cámara de aire consiste en que una porción del tanque se llena de agua, remplazando parte del volumen de aire hasta estar en equilibrio. Una vez accionada la Bomba de Ariete Hidráulico, al producirse el golpe de ariete la válvula antirretorno deja pasar agua, la cual comprime al volumen de aire que funciona como un amortiguador del pulso y al descomprimirse genera un flujo más continuo.

Sus dimensiones varían según el autor para Cobos (s.f.), el volumen mínimo de la cámara de aire debe ser equivalente al volumen de agua gastada en un ciclo. Para Mejía Rojas (2023), el volumen de la cámara de aire será igual al volumen de agua contenida en la tubería de elevación. Para Campaña y Guamán (2011), el volumen de la cámara de aire debe ser entre 20 y 50 veces el volumen entregado en un ciclo. (pág. 128), también proponen una fórmula para la determinación del volumen de la cámara de aire teniendo como variables el caudal bombeado por ciclo, la altura de entrega, la altura de pérdidas en la entrega y la fracción de aumento de presión, la cual se presenta a continuación:

$$V_c = \frac{(1 + x)Dv(h + hr)}{10.33x}$$

Ecuación 9. Volumen de la cámara de aire. Fuente: Campaña y Guamán (2011)

$$x = \frac{h}{h + hr}$$

Ecuación 10. Cálculo de fracción de aumento de presión en la Bomba de Ariete Hidráulico. Fuente: Campaña y Guamán (2011)

Donde:

V_c; Volumen de la cámara de aire, m³

h; Altura de entrega, m

hr ; Altura de pérdidas en la entrega, m

Dv; Máximo caudal de bombeo por ciclo para las condiciones dadas de instalación, m³

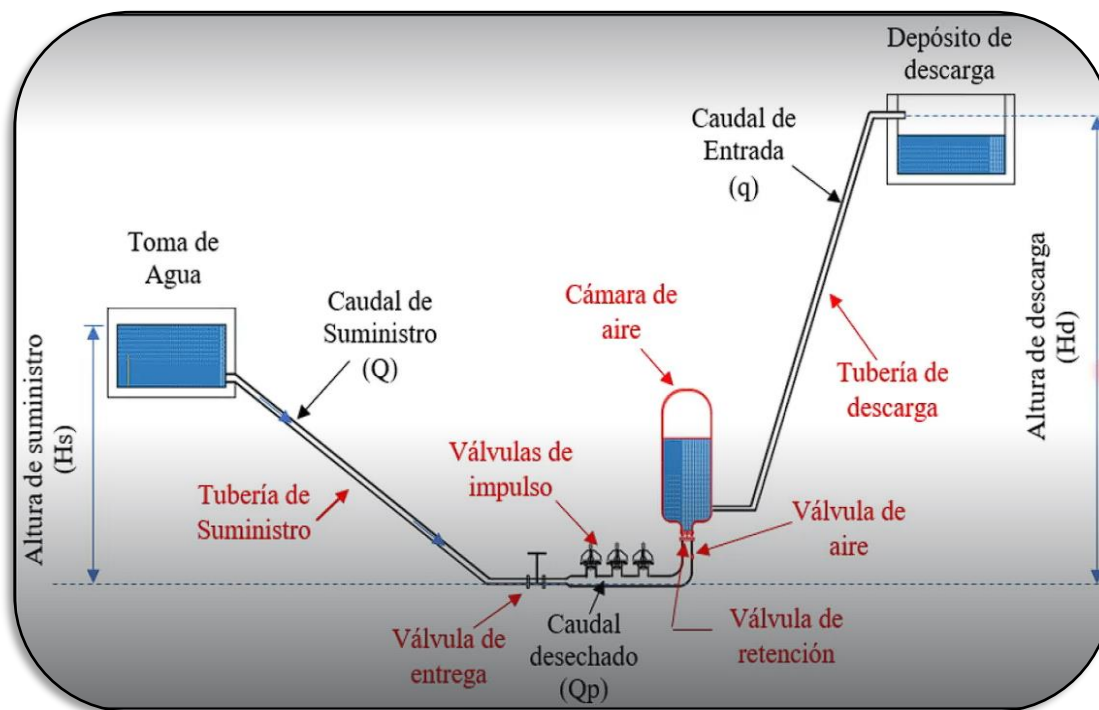
x; Fracción de aumento de presión que permite el bombeo

Válvula de aire

Debido a que el aire se puede disolver en el agua, la cantidad de aire en la cámara de aire puede reducir en periodos largos de tiempo de trabajo, por ello se recomienda hacer uso de la válvula de aire, la cual es una perforación de dimensiones muy pequeñas por debajo de la válvula antirretorno calibrado por una pequeña obstrucción para permitir la entrada de aire y evitar la salida de agua. Si la perforación permanece abierta mucho tiempo puede ocasionar que la Bomba de Ariete Hidráulico solo bombee aire, en el caso contrario no existe el ingreso suficiente de aire para reabastecer la cámara de aire. El agujero se recomienda sea menor a un milímetro de diámetro.

Tubería de elevación

Esta es una tubería que conecta la Bomba de Ariete Hidráulico con el depósito de descarga, sus dimensiones deberán ser la suficientes para alcanzar la longitud hasta la descarga y el diámetro el suficiente para evitar la mayor cantidad de pérdidas por fricción, generalmente su diámetro será menor al del cuerpo de la bomba. Para alturas de elevación muy grandes se recomiendan materiales más resistentes en la conexión directa a la salida de la bomba para resistir la presión y después de cierta altura al reducirse la presión se puede transicionar a materiales menos resistentes para reducir costos.



Esquema 13. Instalación típica de una Bomba de Ariete Hidráulico. Fuente: Cobos (s.f.)

Variables en una Bomba de Ariete Hidráulico

Además de las partes que conforman el sistema bombeo de una Bomba de Ariete Hidráulico hay ciertas variables a considerar para el funcionamiento de este. A su vez están relacionados directamente en cálculo de la eficiencia del sistema. En el Esquema 13, podemos ver señalados en color rojo los elementos del sistema, los cuales fueron mencionadas anteriormente y en señalados en color negro las variables a considerar en el sistema.

Caudal de alimentación

Será el volumen de agua proporcionado a la Bomba de Ariete Hidráulico en un periodo de tiempo desde el depósito de alimentación. Este volumen de agua dentro del sistema de la bomba se divide en dos: el caudal bombeado y el caudal desechado.

Caudal de entrega

Este caudal es el correspondiente al total bombeado por la válvula de impulsión y el cual cruza la válvula antirretorno en dirección a la tubería de alimentación. El valor del caudal de entrega es menor al del caudal de alimentación debido a que la otra parte del caudal es gastado en el caudal desechado.

Caudal desechado

Este caudal se refiere al flujo de agua por las válvulas de impulsión, la cual sale del sistema y no es bombeada, esto debido a que en la etapa del cierre de las válvulas de impulsión el agua fluye hasta alcanzar la aceleración necesaria para cerrarlas y generar el golpe de ariete.

Para algunos autores se considera como un desperdicio de agua, pero realmente el agua del caudal desechado puede regresar al cuerpo de la fuente aguas abajo de esta, considerando la Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012, es posible mantener caudales provenientes de escurrimientos para la conservación de los ecosistemas además de proveer agua para los usos domésticos, pecuario y agrícola.

El valor para Cobos (s.f.) se puede obtener con la siguiente ecuación.

$$Q_{des} = \frac{(Q_a * a * t)}{2 * v}$$

Ecuación 11. Caudal desechado en sistema de Bomba de Ariete Hidráulico. Fuente: Cobos (s.f.)

Donde:

Q_{des} ; Caudal desechado, l/min

Q_a ; Caudal máximo de alimentación, l/min

a ; Aceleración del agua la tubería de alimentación, m/s^2

t ; Tiempo de cierre de la válvula de ariete, s

v ; Velocidad máxima en la tubería de alimentación, m/s

Altura de alimentación

Esta es el desnivel vertical desde el espejo de agua del depósito de alimentación hasta la base de la zona de válvulas de impulsión. Se recomienda que la altura mínima sea de un metro. En casos de altura de entregas bajos de menos de 2 m de altura se puede elevar agua con una altura de alimentación de 80 cm. Y se recomienda prevenir el uso de materiales resistentes a altas presiones después de los 5 m de altura de alimentación ya que el golpe de ariete puede multiplicar casi 20 veces la presión pudiendo llegar a los 100mca, lo que puede acelerar el deterioro. (Pérez, s.f.)

Altura de entrega

Este es el desnivel que existe entre la base de la zona de válvulas de impulsión y el punto de descarga de agua en la tubería de entrega.

Desnivel de trabajo

Aunque la altura de entrega sea la altura a la que se necesita elevar el recurso, no es igual a la presión que necesita vencer la bomba debido a que por el principio de vasos comunicantes parte de la tubería de elevación es abastecida desde el depósito de alimentación. Entonces la altura restante aunada a la altura por pérdidas se elevará por medio de la Bomba de Ariete Hidráulico, dicha altura se denomina desnivel de trabajo.

Rendimiento de la Bomba de Ariete Hidráulico

La altura de entrega y la altura de alimentación están muy relacionadas, como se mencionó, la presión proporcionada por la alimentación es la que se logra aprovechar y multiplicar para obtener una altura de entrega, entonces mientras la relación de altura de entrega (h) entre altura de alimentación (H) sea más baja, mejor resultado tendrá la Bomba de Ariete Hidráulico, esto se puede ver en la

Tabla 12.

Para Cobos (s.f.) se recomienda mantener esta relación (h/H) entre 6 a 10, correspondiente a un rendimiento entre 0.67 y 0.43.

Tabla 12. Rendimiento por relación h/H. Fuente: Cobos (s.f.)

h/H	2	3	4	6	8	10	12
Rendimiento	0.85	0.81	0.76	0.67	0.57	0.43	0.23

Caudal de elevación

El cálculo exacto del caudal de elevación es bastante complejo debido a que este depende de múltiples variables que son bastantes de cuantificar por ello se puede hacer uso de una fórmula para obtener un valor aproximado para un sistema de Bomba de Ariete Hidráulico.

$$q = \frac{R * Q * H}{h}$$

Ecuación 12. Caudal de elevación aproximado en sistema de Bomba de Ariete Hidráulico. Fuente: Cobos (s.f.)

Donde:

q; Caudal de elevación, l/min

h; Altura de elevación, m

H; Altura de alimentación, m

Q; Caudal de alimentación, l/min

R; Rendimiento, adimensional

Ventajas y Desventajas del uso de Bomba de Ariete Hidráulico

Algunas de las ventajas que nos menciona el (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1997) del uso de este tipo de bombas son:

- Requerimientos de mantenimiento mínimos; que consiste en ajuste y calibración periódica (cada tres meses),
- Funcionamiento continuo, mientras haya un flujo de agua que lo alimente
- Ahorro de energía (eléctrica y de combustibles fósiles) que repercute directamente en la economía. (pp. 101-102)

Otras ventajas del uso de este sistema de bombeo son:

- Al no usar combustibles fósiles es una solución ecológica y sostenible.
- Durabilidad debido a la consideración de los materiales adecuados tiene una vida útil muy larga
- Auto operativas, una vez funcionando no necesitan intervención humana
- Su fácil instalación la hace accesible a localidades aisladas o sin acceso a energía eléctrica.
- Puede hacerse con una cantidad basta de materiales, desde muy comunes a muy especializados.
- Su uso es amplio, generalmente se han utilizado tanto para riego, como ganado o abastecimiento humano.

Una desventaja que se menciona recurrentemente es el poco caudal de entrega comparado con el caudal de entrada, que, aunque puede ser cierto, el correcto y óptimo uso de este tipo de bombas es la recuperación del agua excedente para recarga de los cuerpos de agua.

Software Allievi

Como punto de referencia para contrastar los datos a obtener de manera experimental del prototipo de Bomba de ariete hidráulico, se hará uso de un programa de cómputo llamado Allievi.

Allievi es un paquete informático cuyo objetivo principal es el análisis y simulación de transitorios hidráulicos en sistemas complejos, cuyo algoritmo ha sido contrastado durante años con proyectos reales.

El programa está pensado para ser usado tanto en la fase de diseño de un sistema hidráulico como el análisis de su funcionamiento, dado que permite simular el sistema con o sin dispositivos de protección contra transitorios hidráulicos. El programa también basa su funcionamiento en diferentes metodologías, esto para la resolución de problemáticas en diferentes casos, como son conductos a presión, lámina libre, o estos en conjunto.

Para el caso de los conductos a presión, el transitorio hidráulico se modela aplicando ecuaciones de conservación de masa y de cantidad de movimiento a un volumen de control que incluye la onda de presión que se mueve a lo largo de la conducción, obteniendo un sistema de dos ecuaciones diferenciales con dos incógnitas, siendo la altura piezométrica $H = H(x, t)$ y la velocidad $V = V(x, t)$, siendo la forma de este sistema la siguiente:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + f \frac{V|V|}{2D} &= 0 \end{aligned}$$

Ecuación 13. Sistema de dos ecuaciones diferenciales con dos incógnitas para conductos a presión.

Este sistema (Ecuación 13) no tiene una solución analítica por lo que para su integración, el procedimiento habitual es admitir que la solución se obtiene en instantes de tiempo determinados con un intervalo de Δt y en puntos concretos sobre la conducción con un intervalo Δx , cumpliendo con una condición para la celeridad de onda de presión en la tubería siendo $a = \Delta x / \Delta t$. Con esta suposición, las ecuaciones diferenciales se transforman en un sistema de 2 ecuaciones algebraicas, lineales, con dos incógnitas de la forma:

$$\begin{aligned} H_i^{n+1} - H_{i-1}^n + \frac{a}{g} (V_i^{n+1} - V_{i-1}^n) + \frac{f_{i-1}^n \Delta x}{D} V_{i-1}^n |V_{i-1}^n| \\ H_i^{n+1} - H_{i+1}^n - \frac{a}{g} (V_i^{n+1} - V_{i+1}^n) - \frac{f_{i+1}^n \Delta x}{D} V_{i+1}^n |V_{i+1}^n| \end{aligned}$$

Ecuación 14. Sistema de dos ecuaciones algebraicas, lineales, con dos incógnitas para conductos a presión.

Con las que se puede calcular la altura piezométrica H y la velocidad V en el punto i de la tubería y en el instante de cálculo $n+1$, a partir de los valores de H y V de los puntos $i-1$ e $i+1$ en el instante n . La aplicación de este sistema se le denomina “método de las características” y es el fundamento de cálculo del programa Allievi. Con el se puede resolver todos los puntos de cálculo de cualquier conducto por excepción de sus extremos. En ellos se supone que la tubería se conecta con algún tipo de elemento del sistema, donde su condición de contorno sustituye a una de las ecuaciones del sistema permitiendo al programa simular el funcionamiento en régimen transitorio de un sistema hidráulico a presión.

Para el caso de conductos en lámina libre donde el transitorio puede producirse por el accionamiento de compuertas, cambios de nivel del agua en los depósitos conectados al conducto, o por variaciones del caudal de aporte, el régimen transitorio en estos conductos se rige por las ecuaciones de Saint-Venant, que se deriva de la aplicación de las ecuaciones de conservación de masa y de cantidad de movimiento a un volumen de control que incluye el cambio en las condiciones del flujo en el conducto, como se muestra a continuación.

$$\frac{\partial y}{\partial t} + V \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{A}{T} \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(s_0 - s_f) = 0$$

Ecuación 15. Sistema de dos ecuaciones diferenciales con dos incógnitas para conductos a lámina libre.

Las incógnitas en el sistema son el calado (tirante) $y = y(x, t)$ y la velocidad $V = V(x, t)$, ambas en función de la posición a lo largo del conducto y del tiempo.

Donde:

A ; sección ocupada por el flujo, m^2

T ; ancho de la superficie libre definido por la sección A , m

S_0 ; pendiente de solera (base) del canal

S_f ; pendiente hidráulica

$$S_f = \frac{n^2 V^2}{Rh^{4/3}}$$

Ecuación 16. Pendiente hidráulica

Donde:


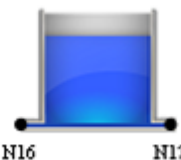


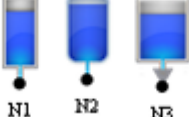
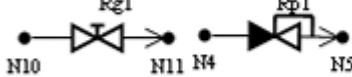

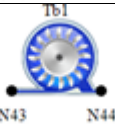

n ; coeficiente de Manning

Rh ; radio hidráulico se la sección ocupada por el fluido

Este sistema (Ecuación 15) se puede resolver de forma semejante al sistema para conductos a presión, en este caso la condición será $\Delta x/\Delta t = (V \pm c)$ donde c ; es la celeridad de la onda de gravedad en el conducto, de valor $c = \sqrt{g \frac{A}{T}}$

El programa Allievi permite la simulación para sistemas donde existen conductos a presión y en lámina libre, aplicando el método de las características al conjunto, cada uno de ellos con su propia formulación, considerando que el tiempo característico para la resolución de los transitorios a presión es de decimas o centésimas de segundo y para los de lámina libre es de segundos.

Tabla 13. Tipos de elementos del programa Allievi. Fuente: Universidad Politécnica de Valencia (2018)

Tipos de elementos	Representación gráfica en el programa Allievi.
Nudos	
Depósitos	
Tuberías	
Estaciones de bombeo	
Estructuras de protección	
Estructuras de control de caudal	
Leyes de caudal (Q) o de altura (H)	
Turbinas Francis	
Conductos en lámina libre	

En el caso del régimen permanente el programa lo obtiene procesando el cálculo del régimen transitorio a partir de condiciones de funcionamiento cualesquiera, elementos del sistema en posiciones iniciales y sin efectuar maniobras. Al obtener condiciones de funcionamiento no variables en el tiempo, se adoptan como valores de partida para iniciar el cálculo del régimen transitorio.

Para simular redes hidráulicas es necesario dibujar las instalaciones en el programa. Para ello en la barra de herramientas de dibujo encontraremos todos los iconos que permitirán realizar el dibujo. La interfaz está pensada para que el usuario con un solo clic introduzca los elementos necesarios para crear desde un sistemas simples o tan complejos como se requiera. El programa Allievi cuenta con una basta opción de elementos que se pueden incluir en la simulación de un sistema, como pueden ser tuberías, canales, depósitos con diferentes características, estaciones de bombeo de bombeo entre las más conocidas, además cuenta con la capacidad de incluir elementos más complejos como lo son válvulas o equipos de protección, cada uno de estos se puede ver en la Tabla 13.

En general cada elemento dispone de dos nudos, uno inicial y otro final, de manera que el sentido positivo del caudal en cada elemento se establece cuando circula desde el nudo inicial hasta el nudo final. Los elementos están agrupados en cinco categorías, estas son, elementos básicos, depósitos, válvulas, estructuras de protección y un grupo de varios, como se muestra en la Imagen 2.

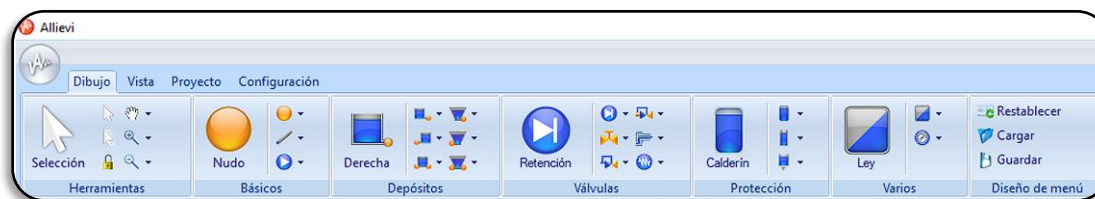


Imagen 2. Menú de dibujo del programa Allievi. Fuente: Universidad Politécnica de Valencia (2018)

La manera de introducir los elementos en el programa es muy sencilla, no lleva más de unos pocos pasos como se presenta a continuación:

Ir al menú Dibujo → Elegir una de las 5 categorías antes mencionadas → Seleccionar el elemento necesario.

El programa una vez introducido un elemento, solicita ingresar ciertas características para cada uno de ellos. En el caso de los nodos basta con la cota y una denominación que no se repita, esto para identificar y diferenciarlo de otros nodos. El editor de propiedades contiene las características dimensionales y funcionales de cada uno de los elementos, para acceder a esta información deben haberse empezado a representar los elementos del sistema.

La ventaja de este programa es que, a diferencia de muchos otros, permite ver sus resultados de cálculo del régimen transitorio en base a los resultados del régimen permanente, de esta manera podemos saber las condiciones iniciales y la manera en que el transitorio las afecta.

El cálculo del régimen permanente se puede realizar desde un botón en el menú proyecto. Una vez hecho el cálculo, al mostrar los resultados se presentan variables para cada elemento como, presiones en los nudos, caudales por tuberías, alturas de bombeo, etc.

Una vez teniendo los resultados del régimen permanente, el siguiente paso es el cálculo del régimen transitorio y analizar los resultados. El programa presenta varias opciones para la obtención de resultados.

El asistente de resultados es una de las opciones con las que cuenta el programa, esta se puede encontrar en el menú proyecto. Esta consiste en una serie de pasos que sirve de guía en la obtención de gráficas y o animaciones.

Otra de las opciones que se encuentran disponibles es 1-Click Chart, la cual permite acceder a los resultados de un elemento o conjunto de éstos con un único clic. Al seleccionar el elemento, con un clic derecho se accede automáticamente a la gráfica que se necesite.

Por otra parte, para analizar resultados y contrastar gráficas en concreto con diferentes condiciones, existe la herramienta SmartCharts, la cual permite guardar gráficas que ya han sido configuradas y tenerlas siempre disponibles.

Por último, el programa Allievi permite la animación de los resultados, con lo cual se puede observar la evolución del transitorio en función del tiempo en tuberías y canales. Estas podrán realizarse desde el asistente de resultados o con 1-Click Chart.

Otras capacidades del software Allievi son:

- Definir diferentes escenarios de cálculo para una misma red, y así optimizar los elementos de protección mediante comparaciones.
- Modelar estaciones de bombeo complejas, utilizando curvas características de las bombas proporcionadas por el fabricante
- Simular el comportamiento del sistema en régimen transitorio sin haber seleccionado bombas, haciendo uso de las llamadas curvas características universales.

- Simular el comportamiento de válvulas automáticas cuya misión sea mantener constante una consigna de presión o caudal.
- Permite la inserción de ventosas y roturas en las tuberías.
- Disponer de asistentes para el cálculo de determinados parámetros tales como celeridad, inercia de las bombas, presión de hinchado de calderines, etc.
- Simulación de transitorios en transporte de líquidos industriales y petroquímicos.

El uso del software permite analizar las variaciones producidas por el cambio de dimensiones en la componente de la Bomba de Ariete Hidráulico, llamada cámara de aire esto gracias a que el software permite el análisis de calderines, los cuales son estructuras que almacenan un cierto volumen de agua y gas comprimido, en este caso aire el cual absorbe y libera caudal durante un transitorio hidráulico. Este es un funcionamiento parecido al de la cámara de aire, por lo que permitirá hacer un correcto modelado de los componentes y su comportamiento ante el fenómeno transitorio.

Los calderines son dispositivos de acción indirecta para protección en contra de los efectos de un transitorio hidráulico, este es uno de los dispositivos más utilizados en instalaciones de bombeo. Se trata de una reserva de gas (aire o nitrógeno) que actúa como un colchón a modo de resorte, permitiendo amortiguar las oscilaciones de presión. Entre su clasificación los tipos más comunes son calderines con contacto gas-agua y calderines con membrana.

El calderín con contacto gas-agua, como su nombre lo indica, el agua en todo momento está en contacto con el gas, el cual generalmente es aire, suele presentar problemas de disolución del aire en la masa de agua, con lo cual el calderín va perdiendo el efecto de amortiguador, por ello es recomendable incorporar un compresor que reponga la masa de aire.

El otro tipo de calderín, llámese con membrana, incorpora una vejiga en su interior donde se dispone el gas el cual generalmente es nitrógeno, ya que afecta menos al material de la membrana, su función es evitar el contacto del gas con el agua para evitar la posible disolución, además en la entrada de este tipo de calderín se suele disponer de una rejilla para evitar que la membrana pueda romperse en condiciones con el calderín vacío de agua.

CAPÍTULO II
PROCESO DE ENSAMBLAJE Y ENSAYE DEL PROTOTIPO
BOMBA DE ARIETE HIDRÁULICO

Para obtener resultados de la variación de la eficiencia debido al cambio de dimensiones de la cámara de aire en la Bomba de Ariete Hidráulico, se decide realizar un prototipo con el cual se ensayen las diferentes situaciones y con ello obtener los parámetros que definen el comportamiento de cada arreglo, de caudal de entrada, caudal de elevación, caudal desechado, a partir de parámetros definidos los cuáles serán las cotas de alimentación y cotas de elevación.

El proceso de ensamblaje se divide por etapas, las cuales corresponden al funcionamiento de la Bomba de Ariete Hidráulico, dichas etapas son:

- Depósito y línea de alimentación
- Zona A Línea de alimentación y cuerpo de la bomba
- Zona B Zona de válvulas de impulsión
- Zona C Válvula antirretorno
- Zona D Derivación de cámara de aire
- Zona E Tubería de elevación

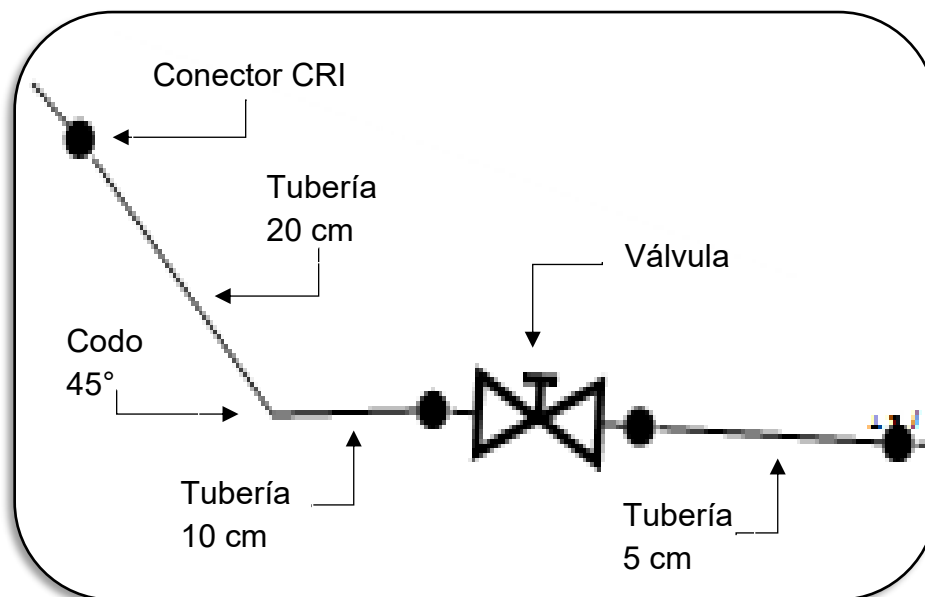
Para realizar las pruebas de manera controlada se emplea un dispositivo de alimentación conformado por una cubeta de 21.6 L a su máxima capacidad, la cual alimentará el sistema por gravedad, este será conectado por medio de una manguera de diámetro nominal de 1" hasta la zona A, la cual corresponde a la línea de alimentación y cuerpo de la bomba.

Zona A Línea de alimentación y cuerpo de la bomba

La línea de alimentación es el inicio en el sistema, este conduce el agua hasta la Bomba de Ariete Hidráulico, este al igual que el cuerpo de la bomba debe ser resistentes a la deformación debido a las sobrepresiones generadas del golpe de ariete. Para la línea de alimentación y cuerpo de la bomba (zona A) se utilizan los componentes mostrados en la Tabla 14

Tabla 14. Materiales de la zona A (línea de alimentación y cuerpo de la bomba)

Cantidad	Material	Descripción
1	Conector CRI	Conexión de rosca interior en cobre de $\frac{3}{4}$ "
1	Tubería de cobre	Tramo de 20 cm de tubería en cobre tipo M en medida de $\frac{3}{4}$ "
1	Codo 45°	Codo de 45° en cobre de $\frac{3}{4}$ "
1	Tubería de cobre	Tramo de 10 cm de tubería en cobre tipo M en medida de $\frac{3}{4}$ "
1	Válvula de bola	Válvula de control tipo bola
1	Tubería de cobre	Tramo de 5 cm de tubería en cobre tipo M en medida de $\frac{3}{4}$ "



Esquema 14. Zona A Línea de alimentación y cuerpo de la bomba

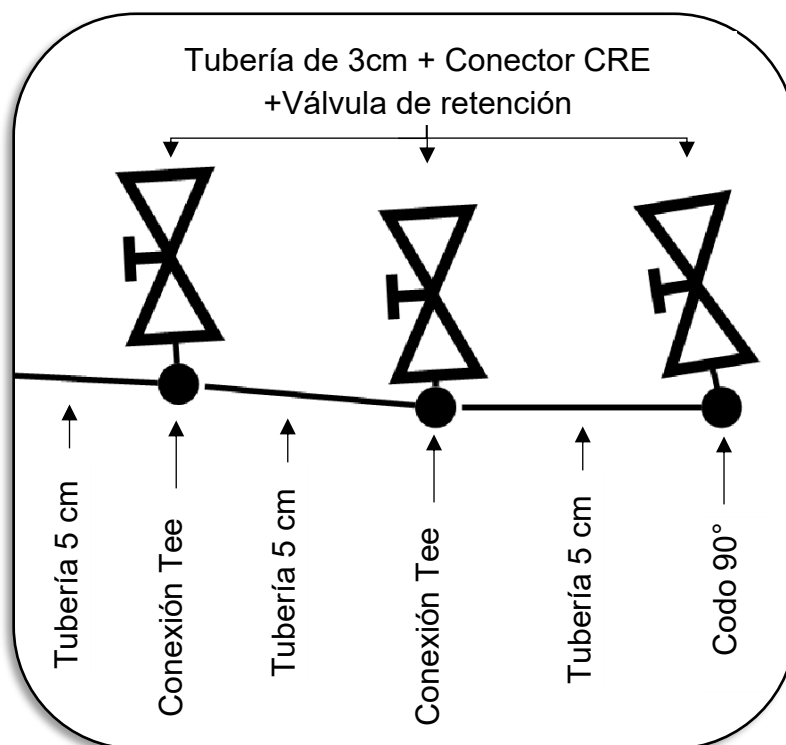
Zona B Zona de válvulas de impulsión

Las válvulas de impulsión se instalan como parte de la bomba, la cual genera la sobrepresión capaz de conducir el agua hasta el lugar de entrega. Esta zona la constituyen tres válvulas iguales, las cuales se conforman individualmente por un tramo de tubería de cobre de 3cm conectado a un conector CRE el cual permite conectar la válvula de retención vertical por medio de una rosca, la válvula debe estar conectada a contraflujo, para ello se deberá ubicar la flecha en la válvula que indica el sentido en el que la válvula permite el paso del fluido. Una vez ubicada se podrá colocar la válvula en sentido contrario al flujo o bien conectar el extremo que señala la flecha con el conector de rosca exterior antes mencionado. Este proceso se repite para las tres válvulas de impulsión.

Las válvulas de impulsión son conectadas entre ellas en serie por medio de tramos de tubería de cobre de 5cm, conexiones Tee y codo de 90°. Las conexiones tipo Tee son para conectar las dos primeras válvulas de impulsión, por el lado de la bifurcación ortogonal y el tipo codo para la válvula en el extremo final. Los tramos de tubería son necesarios para conectar las conexiones (tee y codo), estos tendrán 5cm de longitud, la cual es la longitud mínima para realizar las maniobras necesarias para la manipulación de las válvulas de retención una vez instaladas. Además, uno de los tramos de tubería servirá para conectar la zona de válvulas de impulsión con el resto del sistema. Los materiales se muestran listados en la Tabla 15.

Tabla 15. Materiales de la zona B (válvulas de impulsión)

Cantidad	Material	Descripción
2	Conexión Tee	Conexión Tee en cobre de $\frac{3}{4}$ "
1	Codo 90°	Codo de 90° en cobre de $\frac{3}{4}$ "
3	Tubería de cobre	Tramo de 3 cm de tubería en cobre tipo M en medida de $\frac{3}{4}$ "
3	Conector CRE	Conexión de rosca exterior en cobre de $\frac{3}{4}$ "
3	Válvula de retención vertical	Válvula de retención vertical con embolo cierre por peso en bronce de $\frac{3}{4}$ " con extremos roscados
3	Tubería de cobre	Tramo de 5 cm de tubería en cobre tipo M en medida de $\frac{3}{4}$ "



Esquema 15. Zona B zona de válvulas de impulsión

Cada válvula de retención vertical es modificada, agregando una pieza metálica y roscada en su interior para conectarse al embolo de estas y aumentar su peso, esto ocasiona que la válvula una vez cerrada por el impulso del agua vuelva a abrir durante el fenómeno transitorio.

De igual manera el agregar peso en las válvulas resulta en el aumento del tiempo que tarda en estar completamente cerrada, el aumento excesivo resulta en que la válvula no logre cerrar, perdiendo así su funcionalidad. El peso total de la masa añadida y el émbolo es de 40 gramos.

En estas válvulas modificadas, debido a su configuración un mayor peso resulta en un cierre no uniforme teniendo efectos negativos en el funcionamiento esperado.



Imagen 3. Configuración de la válvula de impulsión

Zona C Válvula antirretorno

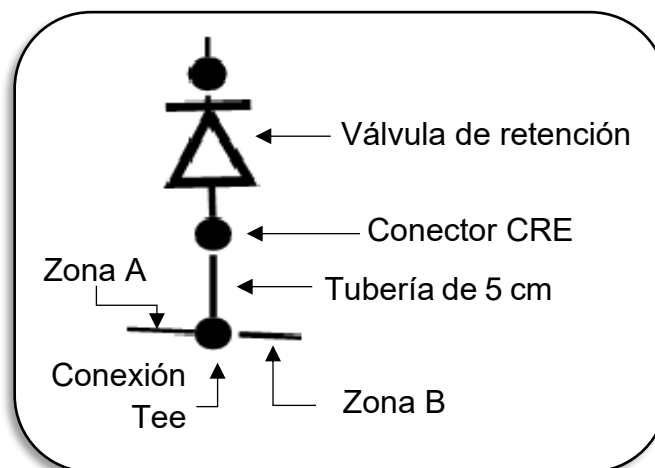
Esta parte toma parte en el funcionamiento una vez elevado el caudal de agua, debido a que la sobrepresión se presenta en manera de pulsos no es capaz de mantener una columna de agua por sí sola, ya que el flujo tiende a regresar para alcanzar el mismo nivel que en extremo del depósito de alimentación a válvula antirretorno evita que el flujo regrese una vez bombeado.

En esta zona se hará la conexión de la zona A con la zona B, por medio de sus extremos de tubería con cada uno los extremos paralelos de una conexión Tee, utilizando soldadura blanda 50/50 y conectando la válvula antirretorno por el extremo perpendicular, asegurándonos que las 3 zonas A, B y C, queden con todos los cambios de dirección de manera vertical, esto para que se tenga el comportamiento esperado de las válvulas de impulsión como de la cámara de aire.

Para ensamblar la zona C se utilizarán los materiales que se presentan en la Tabla 16. Los materiales aparecen en la tabla con el mismo orden en el que deberán ser acoplados. Para este caso se deberá asegurar que la válvula se instale permitiendo el paso del fluido proveniente desde la conexión de las zonas A y B y restringirlo en sentido contrario, esto permitirá mantener la tubería de elevación siempre llena debido a que por el principio de vasos comunicantes el agua tendería a regresar hacia el depósito de alimentación al estar este en una cota de elevación menor que la cota de salida de la tubería de alimentación.

Tabla 16. Materiales de la zona C (válvula antirretorno)

Cantidad	Material	Descripción
1	Conexión Tee	Conexión Tee en cobre de $\frac{3}{4}$ "
1	Tubería de cobre	Tramo de 5 cm de tubería en cobre tipo M en medida de $\frac{3}{4}$ "
1	Conector CRE	Conexión de rosca exterior en cobre de $\frac{3}{4}$ "
1	Válvula de retención vertical	Válvula de retención vertical con cierre por resorte en bronce de $\frac{3}{4}$ " con extremos roscados



Esquema 16. Zona C Válvula antirretorno

Hasta este punto del proceso se puede considerar una Bomba de Ariete Hidráulico, pero se necesita la adición de la cámara de aire y la tubería de salida. Así como la zona C sirve como conexión entre dos zonas, la zona D tiene un uso parecido debido a que además de tener su propio propósito en el funcionamiento el cual será para realizar cambios de cámaras de aire, aparte conecta 2 zonas entre ellas.



Imagen 4. Conexión de las zonas A, B y C

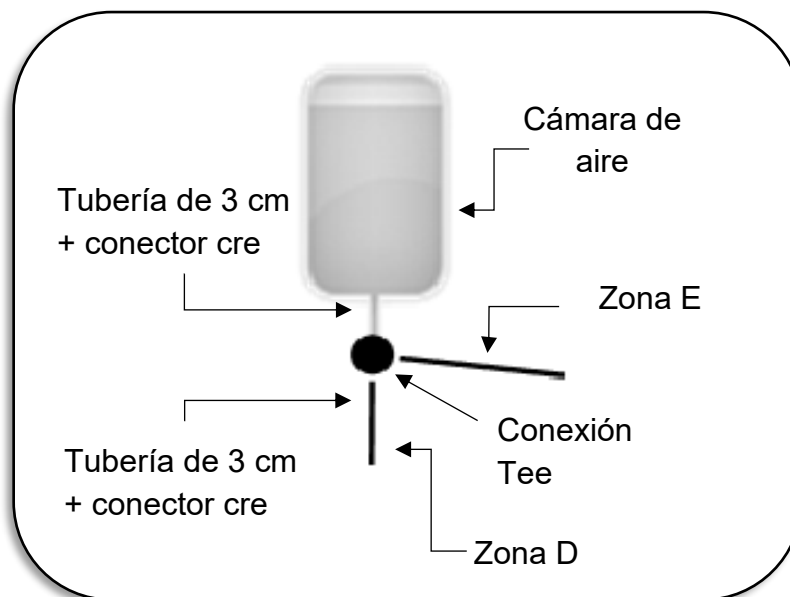
Zona D Derivación de cámara de aire

Debido a que se planea utilizar diferentes cámaras de aire la zona D funciona como una derivación en la cual se puede realizar el cambio de cámara de aire y que a la vez une la válvula de retención con la tubería de elevación. Está conformada por la lista de materiales en la Tabla 17.

El ensamblaje será conectando ambos tramos de tubo en los extremos paralelos de la conexión tee y el extremo de tubería restante servirá para conectar los conectores de cuerda exterior con lo cual se podrá roscar un lado dentro de la válvula antirretorno y otro quede libre para acoplar las diferentes cámaras de aire a utilizar. Por el extremo perpendicular de la conexión Tee se podrá unir la zona de la tubería de elevación.

Tabla 17. Materiales utilizados en zona D (Derivación de cámara de aire)

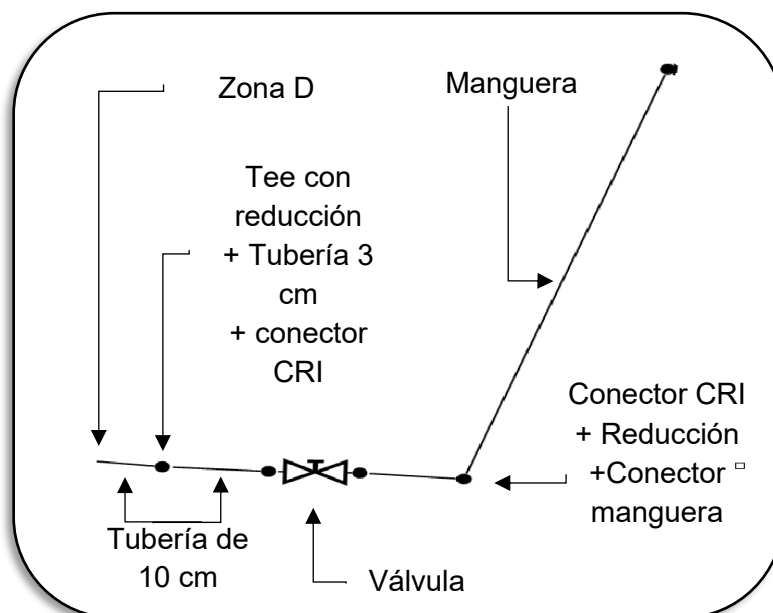
Cantidad	Material	Descripción
2	Conector CRE	Conexión de rosca exterior en cobre de $\frac{3}{4}$ "
1	Conexión Tee	Conexión Tee en cobre de $\frac{3}{4}$ "
2	Tubería de cobre	Tramo de 3 cm de tubería en cobre tipo M en medida de $\frac{3}{4}$ "



Esquema 17. Zona D derivación de cámara de aire

Zona E Tubería de elevación

Esta funciona conduciendo el agua desde la bomba hasta el punto de destino, debido a que el caudal de salida es menor al caudal de salida es recomendable reducir el diámetro de la tubería. Los componentes de la tubería de elevación se listan a continuación en la Tabla 18



Esquema 18. Zona E Tubería de elevación

Tabla 18. Materiales de la zona E (Tubería de elevación)

Cantidad	Material	Descripción
1	Conexión Tee con reducción	Conexión Tee en cobre de $\frac{3}{4}$ " con reducción a $\frac{1}{2}$ " en el extremo perpendicular
1	Tubería de cobre	Tramo de 3 cm de tubería en cobre tipo M en medida de $\frac{1}{2}$ "
1	Conector CRI	Conexión de rosca interior en cobre de $\frac{1}{2}$ "
1	Válvula de bola	Válvula de control tipo bola
2	Tubería de cobre	Tramo de 10 cm de tubería en cobre tipo M en medida de $\frac{3}{4}$ "
1	Conector CRI	Conexión de rosca interior en cobre de $\frac{3}{4}$ "
1	Reducción $\frac{3}{4}$ " a $\frac{1}{2}$ " para manguera	Reducción roscada hembra macho de $\frac{3}{4}$ " a $\frac{1}{2}$ " para manguera
1	Conector a manguera $\frac{1}{2}$ "	Conector estriado macho a manguera $\frac{1}{2}$ "
1	Tubería de cobre	Tramo de 3 cm de tubería en cobre tipo M en medida de $\frac{3}{4}$ "

La zona E, tiene un cambio de materiales de cobre a manguera plástica, al inicio se presentan materiales en cobre, esto para utilizar un manómetro y con él observar la presión de salida del agua, además del uso de una válvula de bola para cerrar el paso a la manguera y evitar el vaciado de la tubería al hacer los cambios de cámaras de aire.



Imagen 5. Conexión de las zonas D y E

El ensamble inicia conectando un tramo de tubería de cobre $\frac{3}{4}$ " de 10cm por ambos lados de la tee con reducción a $\frac{1}{2}$ ", y por el extremo reducido conectar un tramo de tubería de $\frac{1}{2}$ " de 3 cm y en este el conector CRI, en el cual se conectará el manómetro. En uno de los extremos de tubería de 10 cm se conecta la válvula de bola y de esta se conecta un tramo de tubería de 3 cm del cual se conecta el conector CRI, el reductor de $\frac{3}{4}$ " a $\frac{1}{2}$ " roscado y el conector a manguera de $\frac{1}{2}$ " consecutivamente, una vez esta zona terminada se podrá conectar con el resto del sistema por medio del extremo de la conexión tee disponible antes mencionado en la zona D, uniendo a este el tramo de tubería de 10 cm.

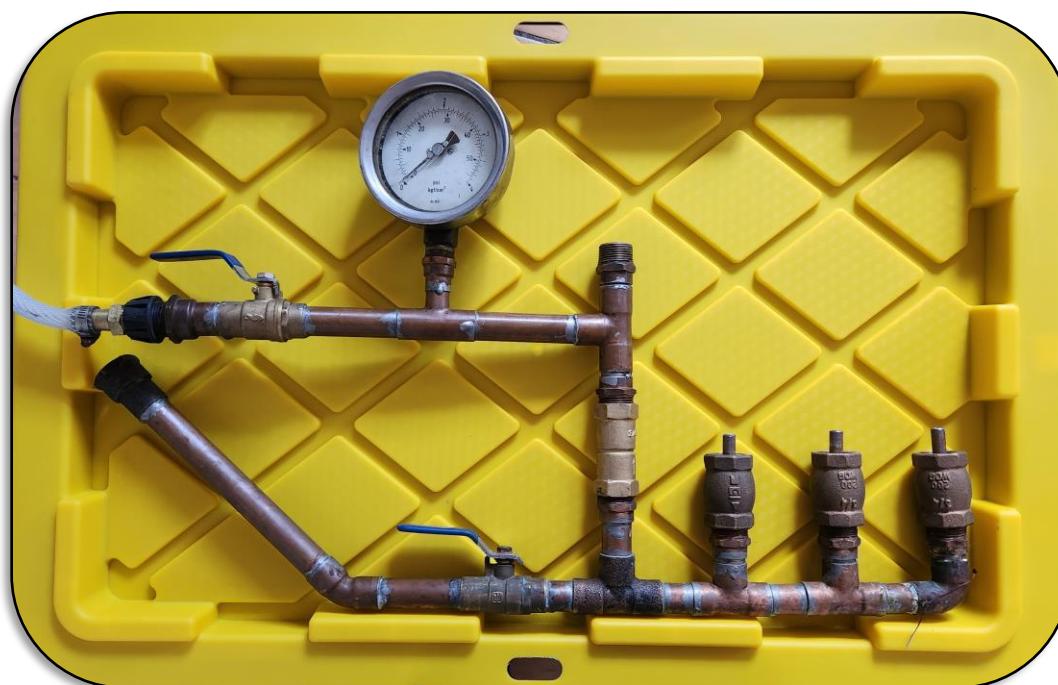


Imagen 6. Bomba de Ariete Hidráulico con conexión disponible para un tanque de aire.

Todas las conexiones por soldadura fueron hechas con soldadura blanda 50/50 como lo especifica la ficha técnica de la tubería de cobre.

Adaptabilidad con diferentes tipos de soldadura						
Aleación	Soldadura blanda 50/50 o 95/5	Soldadura con plata	Soldadura Fosco	Soldadura con Oxiacetileno	Soldadura de Arco en Gas inerte	Soldadura de arco con recubrimiento de Metal
C12200	Excelente	Excelente	Excelente	Buena	Excelente	Excelente

Imagen 7. Ficha técnica de soldadura para tubería de cobre



Imagen 8. Equipo de soldadura

Las cámaras de aire esquemáticamente son iguales, se componen cada una por un conector CRI, un tramo de tubería y un tapón, todo en material de cpvc y en diámetro de $\frac{3}{4}$ " el cambio de volumen se logra cambiando la longitud de tubería. Las longitudes varían entre ellas 10 cm, el escenario inicial es sin utilizar cámara de aire, lo que se soluciona con un tapón roscado para a partir de ahí las dimensiones de las cámaras de aire son 10 cm, 20 cm y 30 cm.



Imagen 9. Tapa y tanques de aire de 10, 20 y 30 cm de longitud.

Análisis de casos en pruebas experimentales en modelo físico

Para el análisis y obtención de datos, se considera la cámara de aire como una variable en el diseño, la cual consta de un volumen diferente en cada escenario. Asimismo, se consideran constantes la cota de alimentación, cota de salida, cota de la bomba y el caudal de alimentación inicial, las cuales se fijan como condiciones de ensayo, cuyos valores se establecen de la siguiente manera:

- Cota de alimentación: 0.95 m
- Cota de salida: 3.00 m
- Cota de la bomba: 0.01 m
- Caudal de alimentación inicial 0.46 l/s

La variable considerada dentro del diseño es la cámara de aire, la cual consta de volúmenes iguales a 0cm^3 , 25.73 cm^3 , 51.46 cm^3 , 77.19 cm^3 correspondientes a cada escenario. Los valores que se obtienen en las pruebas son la presión aportada al sistema, los tiempos de apertura y cierre de las válvulas de impulsión y el caudal de salida. La cota del nivel del agua se encuentra 31 cm por encima de la toma de alimentación, esto para mantener la misma cota de alimentación, el tanque de alimentación se situará en una base de altura constante respecto a la Bomba de Ariete Hidráulico, garantizando que todos los ensayos tengan la misma cota de altura piezométrica inicial, además de esto el depósito de alimentación deberá iniciar en una situación de completamente lleno lo que se traduce en una cota del espejo de agua igual para todos los casos.

La cota de elevación se garantiza asegurando la salida de la tubería de elevación en un punto, el cual deberá estar por encima de la cota del nivel de agua en el depósito, cuya altura corresponde a la suma de la base del depósito más la altura del depósito de alimentación.

Altura de la base	Altura del depósito	Altura de energía estática total
0.95 m	0.31 m	1.26 m

Pruebas del prototipo

Para la realización de todas las pruebas en cada una se deben garantizar las características antes mencionadas, para ello el primer paso a realizar es la instalación del tanque de aire correspondiente a la prueba. Una vez hecho esto se garantiza que el nivel del agua del depósito de alimentación esté a su máxima capacidad.



Imagen 10. Tanque de abastecimiento a su máxima capacidad

El tiempo del ensaye se determina por el tiempo que tarde en vaciarse toda el agua del tanque. El momento de inicio de la prueba se lleva a cabo en cuanto se determina que se cumplen todas las características iniciales, las cuales son el depósito de alimentación se encuentre a su máxima capacidad, las válvulas de control estén completamente cerradas y el depósito que capta el agua elevada se encuentre completamente vacío.

En el momento de iniciar la prueba se abre la válvula previa a la tubería de elevación y posteriormente la válvula en la zona de alimentación de la bomba, una vez ambas abiertas, el agua empieza a fluir dentro del sistema, cuando llega a la zona de impulsión, el agua empieza a salir por esta hasta alcanzar una velocidad la cual logra cerrar las válvulas de impulsión y debido a su orientación invertida respecto al flujo, el cierre genera el fenómeno transitorio el cual se presenta como una sobrepresión en el sistema la cual impulsa al líquido por encima de la altura de energía original . Los escenarios (E) para experimentar con el prototipo son cuatro (E1, E2, E3 Y E4)

Escenario 1

Para este escenario se ensayará el funcionamiento de la Bomba de Ariete Hidráulico sin uso de un tanque de aire.

Materiales
Tapa roscada para tubería de ¾”
Bomba de Ariete Hidráulico
Sellador para roscas

Equipo
Cronómetro
Par de llaves inglesas
Recipiente
Recipiente graduado

Procedimiento

Primero con ayuda de un paño seco, se deberá limpiar el extremo de conexión para las cámaras de aire, después aplicar uniformemente sellador para roscas tanto en la conexión como en la tapa. Realizado lo anterior, se monta la tapa roscando a mano, al llegar casi al tope de la cuerda, con ayuda de las llaves inglesas ajustar la tapa en la conexión

Antes de iniciar con la prueba se deberá colocar un recipiente a la salida de la tubería de elevación el cual captará el agua elevada por la bomba, este deberá estar vacío para no afectar en el volumen medido. El flujo hacía el recipiente será en vertido libre.

Una vez todo ensamblado, se inicia la prueba abriendo en orden las válvulas con dirección aguas abajo hacía aguas arriba, cronometrando desde el momento que se abre la válvula de la línea de alimentación hasta el momento en que el tanque se encuentre en condición de vacío.

Durante este tiempo se cuentan la cantidad de cierres que se hacen. También se registra la presión máxima alcanzada por el manómetro durante los pulsos.

Al finalizar la prueba se procede a cerrar las válvulas y con ayuda de las llaves inglesas retirar la tapa. Y el agua captada es medida en el recipiente graduado

Resultados

Tabla 19. Resultados de prueba en escenario 1

Escenario 1						
Ensayo	Tiempo (s)	Volumen (ml)	Caudal (ml/s)	Presión (kgf/cm ²)	Cierres	Cierres/minuto
1	59.41	250	4.21	5.0	56	56.56
2	73.75	320	4.34	6.0	56	45.56
3	74.78	375	5.01	6.0	55	44.13
4	75.47	375	4.97	6.0	55	43.73
Promedio	70.85	328	4.63	5.8	56	47.49

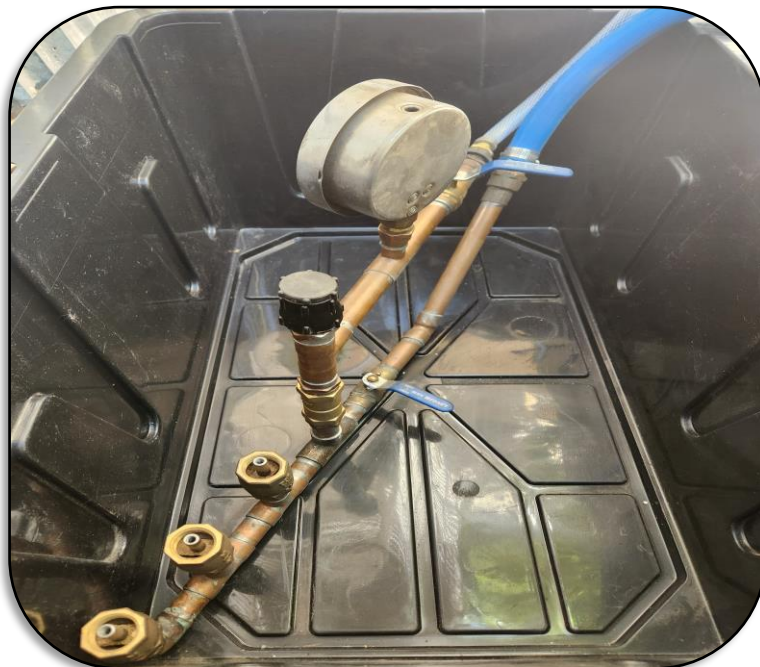


Imagen 11. Bomba de Ariete Hidráulico sin tanque de aire (Escenario 1)

Escenario 2

Para este escenario se ensayará el funcionamiento de la Bomba de Ariete Hidráulico sin uso de un tanque de aire.

Materiales

Tanque de Aire (10 cm)
Bomba de Ariete Hidráulico
Sellador para roscas

Equipo

Cronómetro
Par de llaves inglesas
Recipiente
Recipiente graduado

Procedimiento

Primero con ayuda de un paño seco, se deberá limpiar el extremo de conexión para las cámaras de aire, después aplicar uniformemente sellador para roscas tanto en la conexión como en la tapa. Realizado lo anterior, se monta la tapa roscando a mano, al llegar casi al tope de la cuerda, con ayuda de las llaves inglesas ajustar la tapa en la conexión

Antes de iniciar con la prueba se deberá colocar un recipiente a la salida de la tubería de elevación el cual captará el agua elevada por la bomba, este deberá estar vacío para no afectar en el volumen medido. El flujo hacía el recipiente será en vertido libre.

Una vez todo ensamblado, se inicia la prueba abriendo en orden las válvulas con dirección aguas abajo hacia aguas arriba, cronometrando desde el momento que se abre la válvula de la línea de alimentación hasta el momento en que el tanque se encuentre en condición de vacío.

Durante este tiempo se cuentan la cantidad de cierres que se hacen. También se registra la presión máxima alcanzada por el manómetro durante los pulsos.

Al finalizar la prueba se procede a cerrar las válvulas y con ayuda de las llaves inglesas retirar la tapa. Y el agua captada es medida en el recipiente graduado

Resultados

Tabla 20. Resultados de prueba en escenario 2

Escenario 2						
Ensayo	Tiempo (s)	Volumen (ml)	Caudal (ml/s)	Presión (kgf/cm ²)	Cierres	Cierres/minuto
1	72.10	310	4.30	7.0	55	45.77
2	74.34	375	5.04	6.0	55	44.39
3	77.81	440	5.65	7.0	58	44.72
4	77.00	375	4.87	6.0	57	44.42
Promedio	75.31	374	4.97	6.5	56	44.83



Imagen 12. Bomba de Ariete Hidráulico con tanque de aire de 10 cm (Escenario 2)

Escenario 3

Para este escenario se ensayará el funcionamiento de la Bomba de Ariete Hidráulico sin uso de un tanque de aire.

Materiales
 Tanque de Aire (20 cm)
 Bomba de Ariete Hidráulico
 Sellador para roscas

Equipo
 Cronómetro
 Par de llaves inglesas
 Recipiente
 Recipiente graduado

Procedimiento

Primero con ayuda de un paño seco, se deberá limpiar el extremo de conexión para las cámaras de aire, después aplicar uniformemente sellador para roscas tanto en la conexión como en la tapa. Realizado lo anterior, se monta la tapa roscando a mano, al llegar casi al tope de la cuerda, con ayuda de las llaves inglesas ajustar la tapa en la conexión

Antes de iniciar con la prueba se deberá colocar un recipiente a la salida de la tubería de elevación el cual captará el agua elevada por la bomba, este deberá estar vacío para no afectar en el volumen medido. El flujo hacía el recipiente será en vertido libre.

Una vez todo ensamblado, se inicia la prueba abriendo en orden las válvulas con dirección aguas abajo hacía aguas arriba, cronometrando desde el momento que se abre la válvula de la línea de alimentación hasta el momento en que el tanque se encuentre en condición de vacío.

Durante este tiempo se cuentan la cantidad de cierres que se hacen. También se registra la presión máxima alcanzada por el manómetro durante los pulsos.

Al finalizar la prueba se procede a cerrar las válvulas y con ayuda de las llaves inglesas retirar la tapa. Y el agua captada es medida en el recipiente graduado

Resultados

Escenario 3						
Ensayo	Tiempo (s)	Volumen (ml)	Caudal (ml/s)	Presión (kgf/cm ²)	Cierres	Cierres/minuto
1	47.00	320	6.81	6.0	30	38.30
2	62.90	440	7.00	5.0	41	39.11
3	52.03	375	7.21	5.0	36	41.51
4	72.97	550	7.54	5.0	47	38.65
Promedio	58.73	419	7.14	5.3	39	39.39



Imagen 13. Bomba de Ariete Hidráulico con tanque de aire de 20 cm (Escenario 3)

Escenario 4

Para este escenario se ensayará el funcionamiento de la Bomba de Ariete Hidráulico sin uso de un tanque de aire.

Materiales

Tanque de Aire (30 cm)
Bomba de Ariete Hidráulico
Sellador para roscas

Equipo

Cronómetro
Par de llaves inglesas
Recipiente
Recipiente graduado

Procedimiento

Primero con ayuda de un paño seco, se deberá limpiar el extremo de conexión para las cámaras de aire, después aplicar uniformemente sellador para roscas tanto en la conexión como en la tapa. Realizado lo anterior, se monta la tapa roscando a mano, al llegar casi al tope de la cuerda, con ayuda de las llaves inglesas ajustar la tapa en la conexión

Antes de iniciar con la prueba se deberá colocar un recipiente a la salida de la tubería de elevación el cual captará el agua elevada por la bomba, este deberá estar vacío para no afectar en el volumen medido. El flujo hacía el recipiente será en vertido libre.

Una vez todo ensamblado, se inicia la prueba abriendo en orden las válvulas con dirección aguas abajo hacia aguas arriba, cronometrando desde el momento que se abre la válvula de la línea de alimentación hasta el momento en que el tanque se encuentre en condición de vacío.

Durante este tiempo se cuentan la cantidad de cierres que se hacen. También se registra la presión máxima alcanzada por el manómetro durante los pulsos.

Al finalizar la prueba se procede a cerrar las válvulas y con ayuda de las llaves inglesas retirar la tapa. Y el agua captada es medida en el recipiente graduado

Resultados

Escenario 4						
Ensayo	Tiempo (s)	Volumen (ml)	Caudal (ml/s)	Presión (kgf/cm ²)	Cierres	Cierres/minuto
1	63.71	500	7.85	6.0	47	44.26
2	58.96	500	8.48	5.0	44	44.78
3	60.59	500	8.25	5.0	45	44.56
4	49.88	440	8.82	6.0	35	42.10
Promedio	58.29	487	8.35	5.5	43	43.93

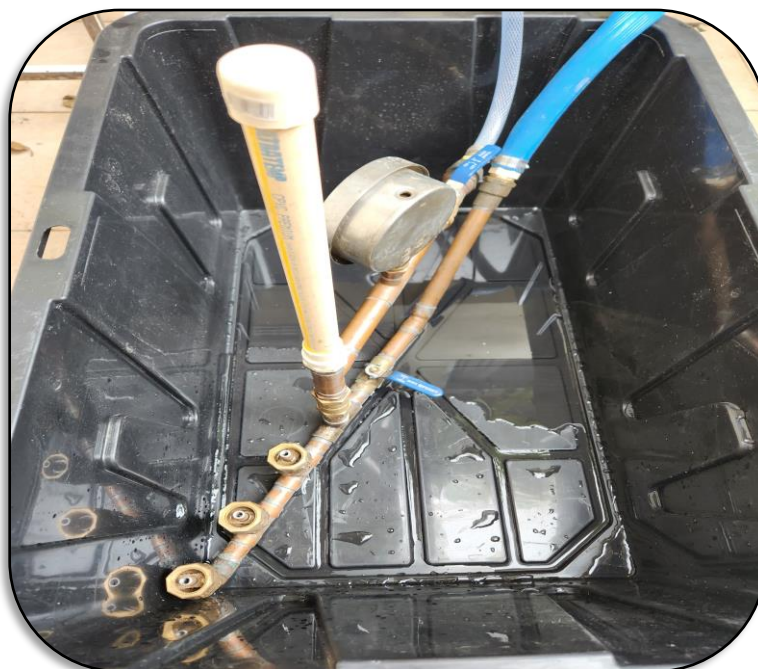


Imagen 14. Bomba de Ariete Hidráulico con tanque de aire de 30 cm (Escenario 4)

CAPÍTULO III
MODELADO Y SIMULACIÓN DE BOMBA DE ARIETE HIDRÁULICO EN
SOFTWARE ALLIEVI

La modelación digital permite simular eventos difíciles de comprender, como lo son los fenómenos transitorios. En el capítulo 1 se menciona el golpe de ariete siendo un fenómeno compuesto por varias etapas que suceden de manera periódica, además en el sistema de Bomba de Ariete Hidráulico no solo ocurre una vez, el transitorio ocurre cada que las válvulas de impulsión cierran. Por lo que el uso del software Allievi para la modelación de la Bomba de Ariete Hidráulico se vuelve de gran importancia para analizar su comportamiento.

A continuación, se presenta el proceso de modelación y resultados de la simulación del comportamiento de la Bomba de Ariete Hidráulico, identificada con las siglas (BAH) ante el cambio del volumen del tanque de aire (TA) en diferentes escenarios. (E)

Modelación

El software Allievi permite la modelación de diferentes elementos, cada uno debe tener una ubicación en el espacio y características específicas, las cuales se asignan y editan según sea el caso.

Nodos		
	Nombre	Cota (m)
	N2	0.95
	N3	0.18
	N4	0.01
	N5	0.01
	N6	0.01
	N7	0.05
	N8	0.05
	N10	0.22
	N11	0.22
	N12	0.22
	N13	0.22
	N14	3
	N15	3
	N16	0.01
	N17	0.01
	N18	0.01
	N19	0.03
	N20	0.03
	N21	0.03
	N22	0.03
	N23	0.03
	N24	0.03
	N25	0.22

Imagen 15. Nodos

Para ubicar cada elemento dentro del espacio virtual del software se hace uso de los nudos, estos son un tipo de elemento que ayudan a identificar el inicio y fin de otro elemento, estos se representan como un punto acotado con la letra N por debajo y permiten asignar una cota a cada uno. Las cotas en cada nodo se muestran en la Imagen 15.

Una vez insertados los nodos, el siguiente paso es dibujar las tuberías, este elemento se representa como una línea negra con una letra T como etiqueta por encima. Estos elementos se ubican entre dos nodos, por lo que los valores de cota previamente asignados se adoptan en los extremos de cada tubería. Para identificar las partes de la bomba a continuación se describe el orden de los elementos. El elemento T1 forma parte de la tubería de alimentación que conecta el depósito a la bomba, los elementos en orden desde T2 hasta T9, comprenden el sistema de BAH, entiéndase cuerpo de la bomba, válvula antirretorno y tubería de elevación. Los elementos T10 a T15, conforman los ramales que conectan entre si a las válvulas de impulsión.

A cada una de estas tuberías se asignan características específicas que influyen en su comportamiento en el modelo, tales son el diámetro, longitud, espesor y celeridad, estos datos se muestran en la Imagen 16.

Tuberías - Datos básicos								
Nombre	Ni	Zi (m)	Nf	Zf (mm)	Dint (mm)	L (mm)	e (mm)	a (m/s)
T1	N2	0.95	N3	180	25.4	3000	3	500.7072
T2	N3	0.18	N4	10	20.6	300	0.8	1174.645
T3	N5	0.01	N6	10	20.6	100	0.8	1174.645
T4	N6	0.01	N7	50	20.6	50	0.8	1174.645
T5	N8	0.05	N25	220	20.6	170	0.8	1174.645
T6	N25	0.22	N10	220	20.6	100	0.8	1174.645
T7	N10	0.22	N11	220	20.6	100	0.8	1174.645
T8	N12	0.22	N13	220	20.6	30	0.8	1174.645
T9	N13	0.22	N14	3000	12.7	3000	2	458.2646
T10	N6	0.01	N16	10	20.6	50	0.8	1174.645
T11	N16	0.01	N17	10	20.6	50	0.8	1174.645
T12	N17	0.01	N18	10	20.6	50	0.8	1174.645
T13	N16	0.01	N19	30	20.6	30	0.8	1174.645
T14	N17	0.01	N20	30	20.6	30	0.8	1174.645
T15	N18	0.01	N21	30	20.6	30	0.8	1174.645

Imagen 16. Datos básicos de tubería en software Allievi.

Tubería	Perdidas locales	Configuración
T1	0	Ninguna
T2	0.515	Codo 45° + Reducción de 1" a 3/4" + Acople
T3	0	Ninguna
T4	1.079	Tee salida + acople
T5	0.079	Acople
T6	1	Tee salida
T7	0.2	Tee directo
T8	0	Ninguna
T9	0.279	Reducción 3/4" + Acople
T10	0.2	Tee directo
T11	0.2	Tee directo
T12	0.2	Tee directo
T13	1.079	Tee salida + acople
T14	1.079	Tee salida + acople
T15	0.279	Codo 90° + acople

La celeridad (a) se calcula dentro del programa con una herramienta en la cual se indica el módulo elástico del material de la tubería, los datos de diámetro y espesor la herramienta los toma de los asignados a cada elemento.

The image shows a software interface for calculating wave speed. It has a title bar 'Calcular celeridad' and four input fields with their values:

Diámetro (mm)	20.60000
Espesor (mm)	0.80000
Coef. material	0.91
Celeridad (m/s)	1,174.6450

Imagen 17. Herramienta de cálculo de celeridad (a) en software Allievi.

Otras características que se asignan son la rugosidad y la sumatoria de coeficientes de pérdidas locales (pérdidas menores) presentes en cada tubería. La opción de caudal nulo se utiliza en específico para el cálculo de régimen permanente en el elemento T9 (tubería de elevación), el cual su nodo final se encuentra por encima de todo el sistema y así evitar que el programa interprete una condición inicial de caudal negativo, imponiendo a todo el elemento la altura piezométrica de su nodo inicial.

Pérdidas		Caudal nulo	
Rug (mm)	k	Qin=0	H Imp
0.005	0	<input type="checkbox"/>	▼
0.002	0.515	<input type="checkbox"/>	▼
0.002	0	<input type="checkbox"/>	▼
0.002	1.079	<input type="checkbox"/>	▼
0.002	0.079	<input type="checkbox"/>	▼
0.002	1	<input type="checkbox"/>	▼
0.002	0.2	<input type="checkbox"/>	▼
0.002	0	<input type="checkbox"/>	▼
0.005	0.279	<input checked="" type="checkbox"/>	Inicial ▼
0.002	0.2	<input type="checkbox"/>	▼
0.002	0.2	<input type="checkbox"/>	▼
0.002	0.2	<input type="checkbox"/>	▼
0.002	1.079	<input type="checkbox"/>	▼
0.002	1.079	<input type="checkbox"/>	▼
0.002	0.272	<input type="checkbox"/>	▼

Imagen 18. Datos adicionales de tuberías en software Allievi

Con el esquema de las tuberías hecho se pueden ubicar los elementos de depósito, calderines (tanques de aire), válvulas de retención y válvulas de regulación.

Los depósitos pueden representarse según sea la ubicación de su salida o llegada, en el modelo se muestra de perfil con su salida del lado derecho El depósito se dibuja conectado directamente al nodo donde comienza el flujo del agua es decir el nodo inicial de la T1, su caracterización depende de los siguientes datos: tipo y sección del depósito, cota inicial del agua e indicar si dicha cota es o no variable a lo largo del tiempo, estos datos se muestran en la Imagen 19

Depósitos - Datos básicos							
Nombre	Ni	Nf	Zs (m)	Tipo ▲	S (m ²)	Z0 (m)	Zvar ▼
D1	---	N2	0.95	PD ▼	0.07	1.26	SI ▼

Imagen 19. Datos básicos en depósitos para software Allievi

La válvula antirretorno se modela con el uso de una válvula de retención las cuales solo permiten el flujo en el sentido que se dibuje, estas se representan con una flecha con una línea perpendicular a su flujo en la punta, estas se acotan con la etiqueta Rt, los datos necesarios para la simulación son su diámetro nominal y los coeficientes adimensionales de pérdida para los casos totalmente cerrada y abierta. Estos datos se muestran en

Válvula Retención - Datos básicos					Pérdidas de carga		
Nombre	Ni	Nf	Z (m)	DN (mm)	k Ramal	k 0%	k 100%
Rt1	N7	N8	0.05	19.1	0	1E+25	6.5

Imagen 20. Datos básicos en válvula de retención para software Allievi

Para el uso de las válvulas de retención en el modelo se debe considerar que para el software tienen un comportamiento ideal, es decir que la válvula se cierra instantáneamente en el momento que el caudal se vuelve negativo. Este funcionamiento no sirve para la caracterización de las válvulas de impulsión, ya que estas dejan pasar un cierto volumen de agua antes de realizarse la maniobra de cierre, es por ello que se modelarán como una válvula de regulación tabulando los instantes de maniobra de apertura y cierre de estas.

En el sistema originalmente se encuentran dos válvulas de regulación de esfera estas identificadas con la etiqueta Rg, una en el cuerpo de la bomba y otra en la tubería de elevación, en la modelación se sumarán a estas las tres válvulas de impulsión debido a que es la válvula con coeficientes de pérdida más parecidos a los de una válvula de retención vertical y una extra a la salida de la tubería de elevación, esto debido a que el software necesita para realizar los cálculos de la simulación que el sistema tenga un elemento que no sea tubería o nodo en su inicio y final, en este caso un depósito al inicio y una válvula al final, esta válvula no afectará los datos al representar una descarga libre.

Las características por señalar en cada una de estas son: diámetro nominal, tipo de válvula y el tipo de maniobra (Imagen 21), esta última al ser tabulada, permite establecer un porcentaje de apertura en un determinado periodo de tiempo, por lo que para cada escenario se cambia la tabla de maniobras de las válvulas Rg3, Rg4 y Rg6 las cuales corresponden a las válvulas de impulsión.

Válvula Regulación - Datos básicos								Maniobra	Tabulada
Nombre	Ni	Nf	Z (m)	DN (mm)	k Ramal	Tipo	Modelo	Tipo	Tabla
Rg1	N4	N5	0.01	19.1	0	Esférica		Tabulada	
Rg2	N11	N12	0.22	19.1	0	Esférica		Tabulada	
Rg3	N19	N22	0.03	19.1	0	Esférica		Tabulada	
Rg4	N20	N23	0.03	19.1	0	Esférica		Tabulada	
Rg5	N21	N24	0.03	19.1	0	Esférica		Tabulada	
Rg6	N14	N15	3	12.7	0	Esférica		Tabulada	

Imagen 21. Datos básicos de válvulas de regulación en software Allievi

Para modelar los tanques de aire se hace con un elemento llamado calderín, el cual es una estructura de protección, en México también son conocidos como vasos de expansión. Este se colocará en el final de la tubería próxima a la válvula antirretorno. Los datos para asignar en el tanque de aire se dividen en etapas, estas son: en datos básicos, características físicas y pérdidas.

En datos básicos se indica el número de calderines y si se encuentra activo su funcionamiento, esto es una herramienta que ayuda a comparar el funcionamiento de un sistema con y sin calderín, además también podemos calcular los valores de pérdidas con la herramienta calc K, en ella se indica si la conexión es por medio de by-pass o no y las medidas de diámetro de las conexiones.

Calderines - Datos básicos					
Nombre	Nudo	Zu (m)	Num	Calc K	Act
C1	N25	0.22	1	...	<input type="checkbox"/>

Imagen 22. Datos básicos de calderín en software Allievi

Para características físicas se indica el diámetro, longitud, rugosidad, cota de la base del calderín, posición, si se tiene vejiga expandible y presión de hinchado. En todos los casos se mantienen los mismos datos a excepción de la longitud del calderín, la cual cambia en un intervalo de 10 cm entre escenarios, desde 0 cm hasta 30 cm. Otro dato que considerar es la presión de hinchado igual a 0, debido a la tolerancia en decimales del programa se omite al no poder ingresar datos en su asistente de cálculo.

Características físicas del calderín								
D (m)	L (m)	V (m ³)	Pred	Rug (mm) ▲	Zb (m)	Posición	Vejiga	P (bar)
0.01905	0.3	0	...	0.003	0.22	Vertical ▼	No ▼	0

Imagen 23. Características físicas de calderín de E4 en software Allievi

En la sección de pérdidas los datos de diámetro K sal y K ent, son asignados por la herramienta calc K, los datos que restan por llenar son la longitud del ramal y la rugosidad absoluta de sus paredes.

S			Pérdidas	
D (mm)	L (m)	Rug (mm)	K sal ▲	K ent
20.6	0.06	0.002	6014571	6862103

Imagen 24. Pérdidas de calderín en software Allievi

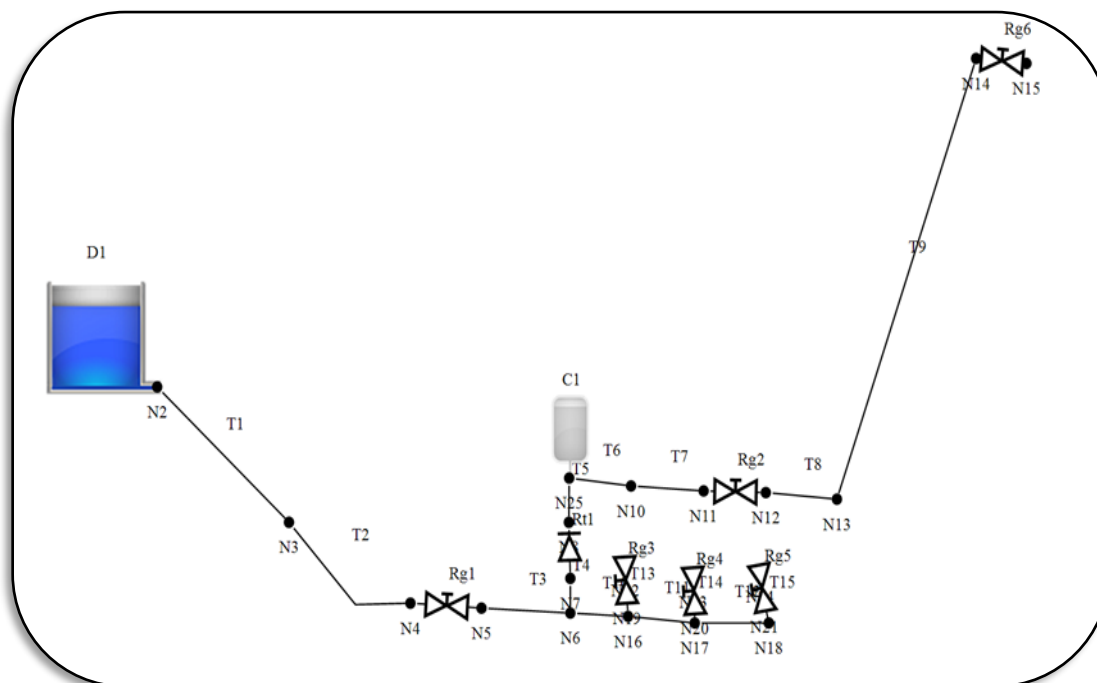


Imagen 25. Modelo del sistema Bomba de Ariete Hidráulico en software Allievi

Simulación

El software Allievi permite comparación de resultados por medio de escenarios a partir de uno base, con esto una vez dibujado el modelo con todos los datos y condiciones que se consideran constantes como son las cotas y características de los diferentes elementos, se crean cuatro escenarios, que cumplirán con el comportamiento de los cuatro escenarios realizados con el prototipo físico, donde las variables en el diseño con las dimensiones de las cámaras de aire y el tiempo de apertura y cierre correspondiente a cada uno de los escenarios.

Debido a que las válvulas de impulsión se caracterizarán con una válvula de esfera habrá que adaptar el porcentaje de apertura máxima en las válvulas para que tengan un comportamiento semejante. El prototipo en una situación de mantener las válvulas de impulsión siempre abiertas tarda un promedio de 47.02 segundos en vaciarse por completo el depósito de almacenamiento, este mismo comportamiento se logra con las válvulas de esfera a un 27% de su apertura total, con esto la situación de totalmente abierta se sustituye por este dato en todos los escenarios.

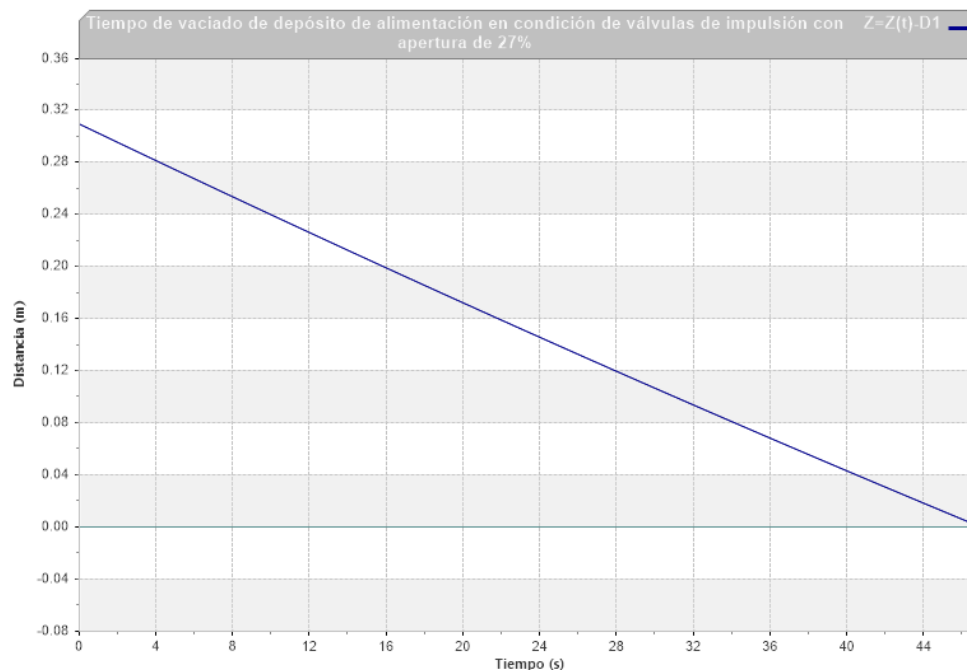


Gráfico 5. Tiempo de vaciado de depósito de alimentación en condición de válvulas de impulsión con apertura de 27%

El programa señala una incidencia con la longitud de la tubería T8, debido a esto el programa modifica la celeridad en este elemento, así como otros semejantes los cuales son T13, T14 y T15, por lo que en el cálculo de estos elementos existe un porcentaje de error. El programa recomienda intervalos de tiempo menores para el cálculo, esta opción no es viable debido a los recursos de cómputo, otra opción es aumentar la dimensión de los elementos y esto no sería una representación fiel al modelo.

Cálculo del régimen permanente

- Hora Inicio: 30/09/2025 11:20:32 p. m.
- Simulación finalizada
- Hora fin: 30/09/2025 11:20:33 p. m.

Resultado simulación

- Simulación finalizada con ÉXITO

Resumen de incidencias

- En el cálculo se ha modificado la celeridad de 1174.6 a 1200 m/s, esto va a producir un error relativo del 94.89 % (> 10 %) en la tubería T8. Se recomienda tomar un intervalo de tiempo para la integración no mayor de 0s ó una longitud múltiplo de .6 m
- Finalizado el cálculo del régimen permanente en 11136 iteraciones

Cálculo del régimen transitorio

- Hora inicio: 30/09/2025 11:22:00 p. m.
- Simulación finalizada
- Hora fin: 30/09/2025 11:23:26 p. m.

Resultado simulación

- Simulación finalizada con ÉXITO

Resumen de incidencias

- En el cálculo se ha modificado la celeridad de 1174.6 a 1200 m/s, esto va a producir un error relativo del 94.89 % (> 10 %) en la tubería T8. Se recomienda tomar un intervalo de tiempo para la integración no mayor de 0s ó una longitud múltiplo de .6 m

Imagen 26. Resumen de incidencias en software Allievi

Escenario 1

Para este primer caso no se contempla el uso de cámara de aire por lo que en los datos básicos de calderín se debe quitar la selección de la opción Act.

Act	D (m)	L (m)
<input type="checkbox"/>	0	0

Imagen 27. Condiciones de simulación en calderín E1

Las maniobras de las válvulas de impulsión se harán con los datos obtenidos del prototipo físico ensayado en el escenario 1 (Tabla 21).

Tabla 21. Datos de válvulas de impulsión E1

Promedio cierres/minuto	Promedio cierres/segundo	Tiempo total de maniobra (s)	Tiempo de apertura (s)	Tiempo de cierre (s)
47.49	0.792	1.263	0.5	0.763

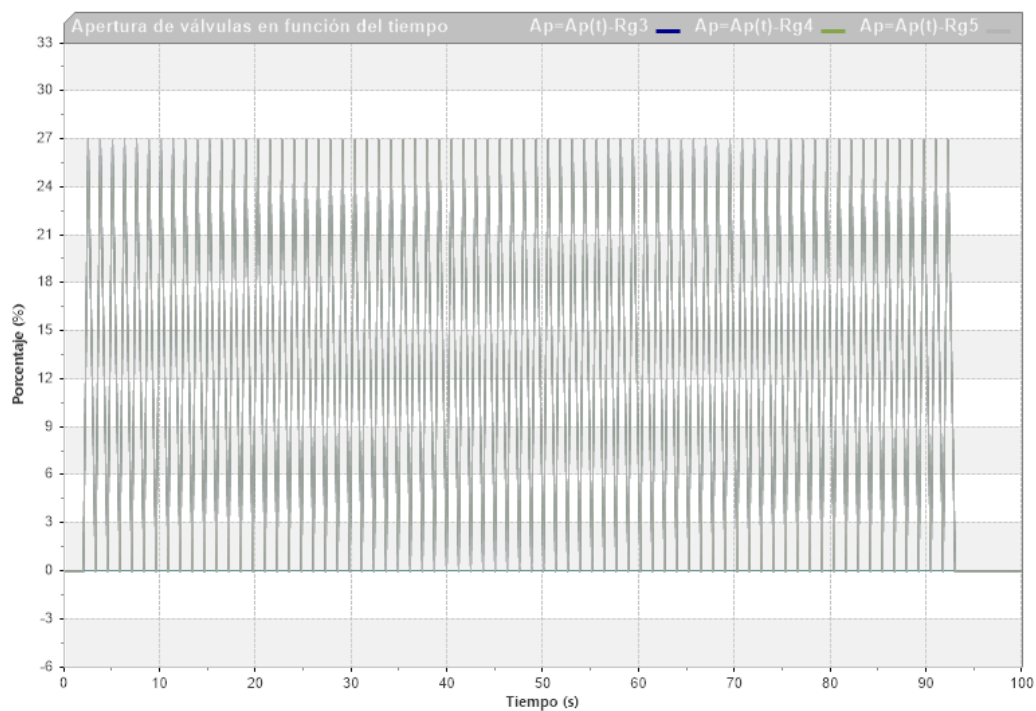


Gráfico 6. Apertura de válvulas en función del tiempo E1

Los promedios de cierre/minuto se utilizan para obtener el tiempo total de maniobra, es decir el tiempo que tardan las válvulas de impulsión estando completamente abiertas en cerrarse y nuevamente abrirse. Las válvulas al abrirse por acción de gravedad su tiempo de apertura es constante y se aproxima a 0.5 s, la diferencia entre el tiempo total de maniobra y el tiempo de apertura resulta en el tiempo de cierre

Con estos datos de tiempo se hace la tabulación de las maniobras de cierre y apertura para las válvulas como se muestra en el Gráfico 6. Cuando la válvula se encuentra completamente cerrada se representa con una apertura de 0% y cuando se encuentra completamente abierta con una apertura de 27%, cada cierre en las válvulas significa una impulsión producto del golpe de ariete. El tiempo que tarda cada válvula en cerrar influye directamente en el volumen de agua desechado del sistema.

Resultados

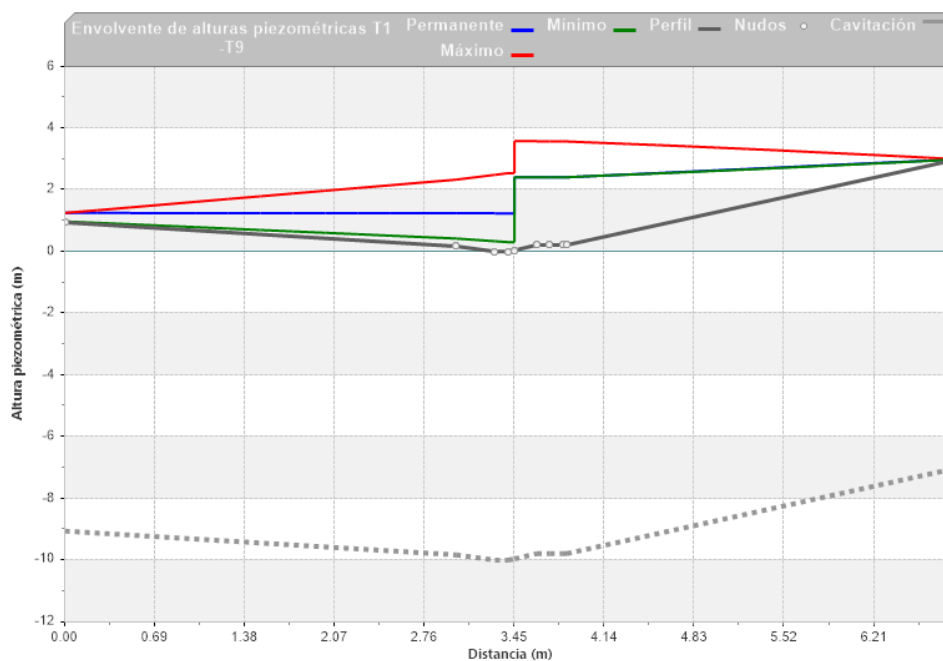


Gráfico 7. Envoltorio de alturas piezométricas en E1

El Gráfico 7 representa las alturas piezométricas en mca a lo largo del sistema, siendo la distancia 0 m el inicio (tubería de alimentación). En este podemos encontrar la altura máxima indicada con una línea roja, la mínima con una línea verde, y la altura en condiciones iniciales con una línea azul. La línea gris representa el perfil del sistema por tuberías delimitadas con un punto blanco, desde la tubería de alimentación hasta la tubería de elevación.

El cuarto punto que se encuentra poco antes de la distancia de 3.45 m se encuentra la zona de válvulas de impulsión por lo que las presiones máximas en distancias menores son en sentido hacia el depósito y distancias posteriores en sentido de la elevación. Además, la línea punteada es un indicador de seguridad siendo que alturas piezométricas por encima al límite evita la presencia del fenómeno de cavitación y con ello rotura de la tubería.

En la gráfica de alturas piezométricas se lee el dato máximo obtenida de 3.58 mca después del bombeo contrastado con 1.26 mca iniciales sin bombeo.

El Gráfico 8 representa los caudales en l/s a lo largo del sistema, siendo la distancia 0 m el inicio (tubería de alimentación). En este podemos encontrar el caudal máximo indicado con una línea roja, el mínimo con una línea verde, y el caudal en condiciones iniciales con una línea azul. El cuarto punto que se encuentra poco antes de la distancia de 3.45 m se encuentra la zona de válvulas de impulsión por lo que el caudal de las zonas anteriores es aportado por el depósito de alimentación mientras que el caudal de las zonas posteriores es aportado por el bombeo. Los valores negativos que se encuentra después de las válvulas de impulsión indican un flujo en sentido contrario. La gráfica muestra un caudal de 0.0029 l/s contrastado con un caudal de 0.49 l/s de entrada.

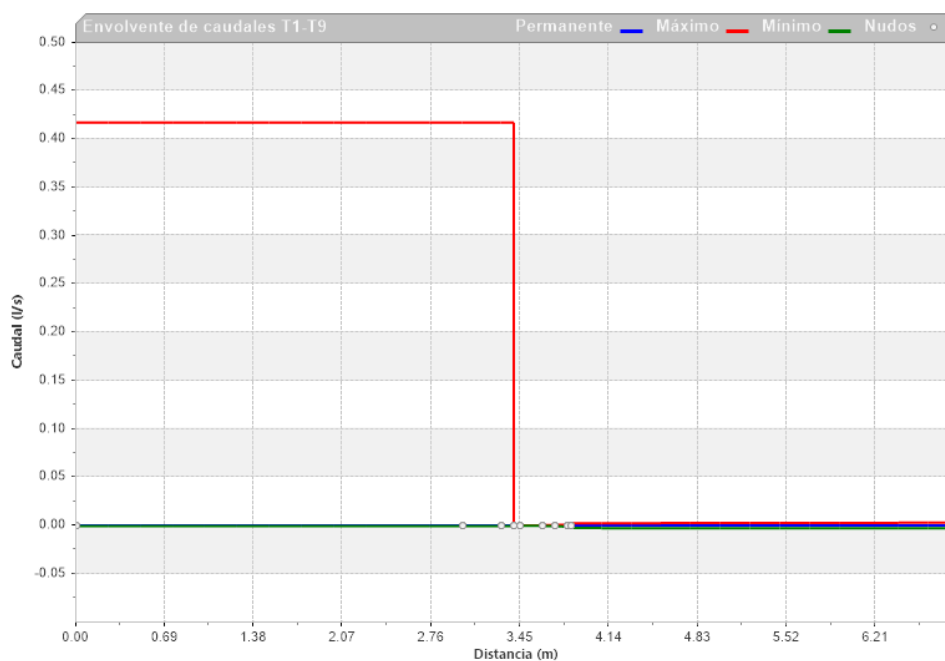


Gráfico 8. Envoltente de caudales en E1

Con los valores obtenidos de ambas gráficas se obtiene la eficiencia de la Bomba de Ariete Hidráulico. Despejando y haciendo uso de la Ecuación 12 se obtiene una eficiencia de 1.69% para el escenario 1.

Escenario 2

Para este segundo caso se contempla el uso de cámara de aire con un volumen de 25.73 cm^3 , por lo que en los datos básicos de calderín se debe seleccionar la opción Act, además de esto se asigna la longitud de 10 cm.

Act	D (m)	L (m)
<input checked="" type="checkbox"/>	0.01905	0.1

Imagen 28. Condiciones de simulación en calderín E2

Las maniobras de las válvulas de impulsión se harán con los datos obtenidos del prototipo físico ensayado en el escenario 2 (Tabla 22).

Tabla 22 Datos de válvulas de impulsión E2

Cierres/minuto	Cierres/segundo	Tiempo total de maniobra	Tiempo de apertura	Tiempo de cierre
44.83	0.747	1.339	0.5	0.839

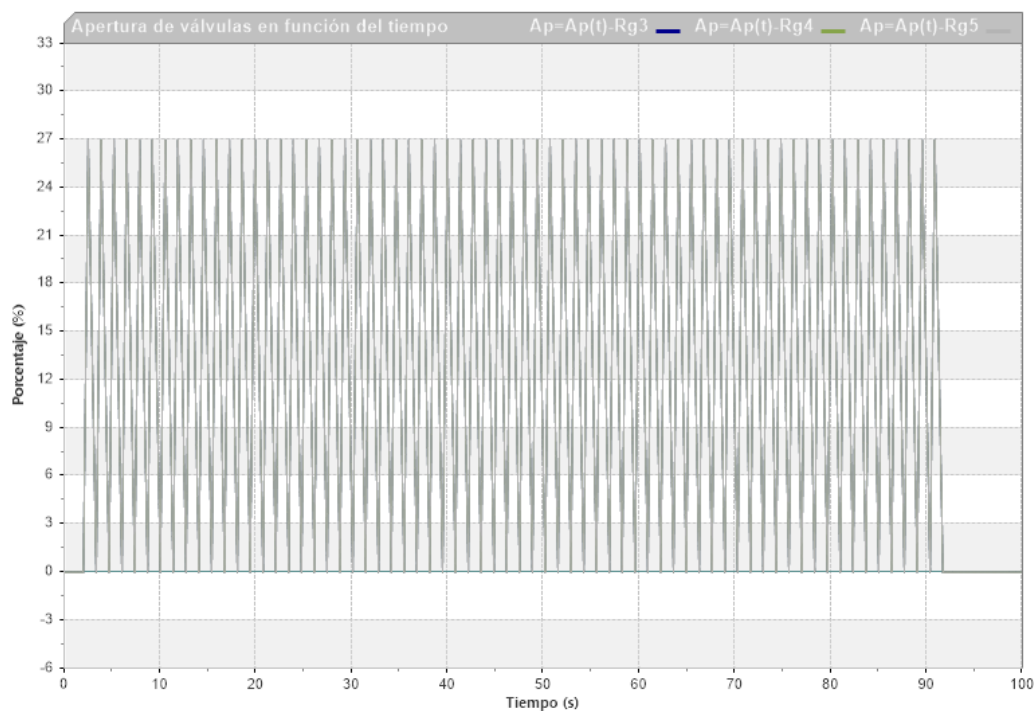


Gráfico 9. Apertura de válvulas en función del tiempo E2

Los promedios de cierre/minuto se utilizan para obtener el tiempo total de maniobra, es decir el tiempo que tardan las válvulas de impulsión estando completamente abiertas en cerrarse y nuevamente abrirse. Las válvulas al abrirse por acción de gravedad su tiempo de apertura es constante y se aproxima a 0.5 s, la diferencia entre el tiempo total de maniobra y el tiempo de apertura resulta en el tiempo de cierre.

Con estos datos de tiempo se hace la tabulación de las maniobras de cierre y apertura para las válvulas como se muestra en el Gráfico 9. Cuando la válvula se encuentra completamente cerrada se representa con una apertura de 0% y cuando se encuentra completamente abierta con una apertura de 27%, cada cierre en las válvulas significa una impulsión producto del golpe de ariete. El tiempo que tarda cada válvula en cerrar influye directamente en el volumen de agua desechado del sistema.

Resultados

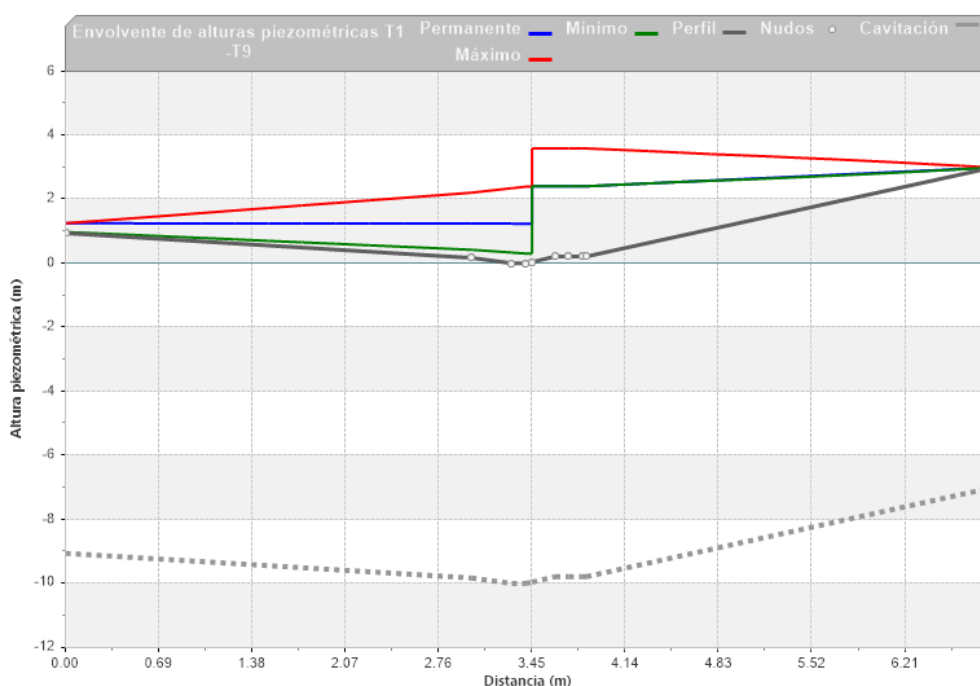


Gráfico 10. Envoltorio de alturas piezométricas en E2

El Gráfico 10 representa las alturas piezométricas en mca a lo largo del sistema, siendo la distancia 0 m el inicio (tubería de alimentación). En este podemos encontrar la altura máxima indicada con una línea roja, la mínima con una línea verde, y la altura en condiciones iniciales con una línea azul. La línea gris representa el perfil del sistema por tuberías delimitadas con un punto blanco, desde la tubería de alimentación hasta la tubería de elevación.

El cuarto punto que se encuentra poco antes de la distancia de 3.45 m se encuentra la zona de válvulas de impulsión por lo que las presiones máximas en distancias menores son en sentido hacia el depósito y distancias posteriores en sentido de la elevación. Además, la línea punteada es un indicador de seguridad siendo que alturas piezométricas por encima al límite evita la presencia del fenómeno de cavitación y con ello rotura de la tubería.

En la gráfica de alturas piezométricas se lee el dato máximo obtenida de 3.60 mca después del bombeo contrastado con 1.26 mca iniciales sin bombeo.

El Gráfico 11 representa los caudales en l/s a lo largo del sistema, siendo la distancia 0 m el inicio (tubería de alimentación). En este podemos encontrar el caudal máximo indicado con una línea roja, el mínimo con una línea verde, y el caudal en condiciones iniciales con una línea azul. El cuarto punto que se encuentra poco antes de la distancia de 3.45 m se encuentra la zona de válvulas de impulsión por lo que el caudal de las zonas anteriores es aportado por el depósito de alimentación mientras que el caudal de las zonas posteriores es aportado por el bombeo. Los valores negativos que se encuentra después de las válvulas de impulsión indican un flujo en sentido contrario. La gráfica muestra un caudal de 0.0142 l/s contrastado con un caudal de 0.49 l/s de entrada.

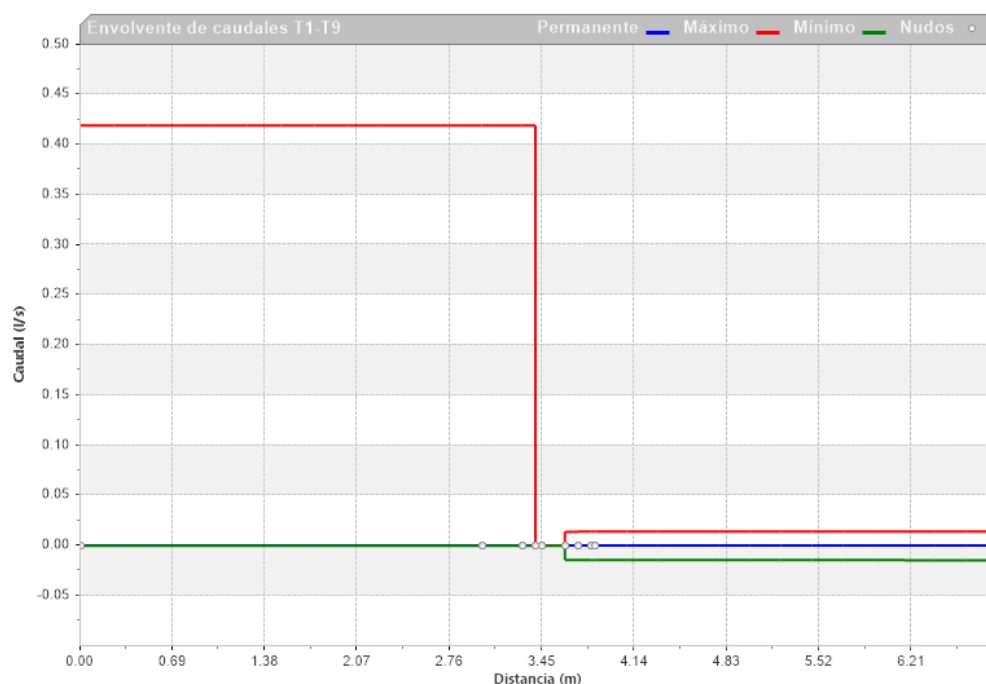


Gráfico 11. Envoltente de caudales en E2

Con los valores obtenidos de ambas gráficas se obtiene la eficiencia de la Bomba de Ariete Hidráulico. Despejando y haciendo uso de la Ecuación 12 se obtiene una eficiencia de 8.28% para el escenario 1.

Para el tanque de aire de 25.73 cm³ en la gráfica se muestra que el valor de volumen máximo de gas en su interior es de 23.5 cm³ mientras que su valor mínimo es de 21.85 cm³, estos cambian y reducen hasta alcanzar una tendencia de 22.65 cm³. Dichas oscilaciones representan la compresión y descompresión del gas dentro del tanque de aire, provocado por la fuerza resultante de la sobrepresión.

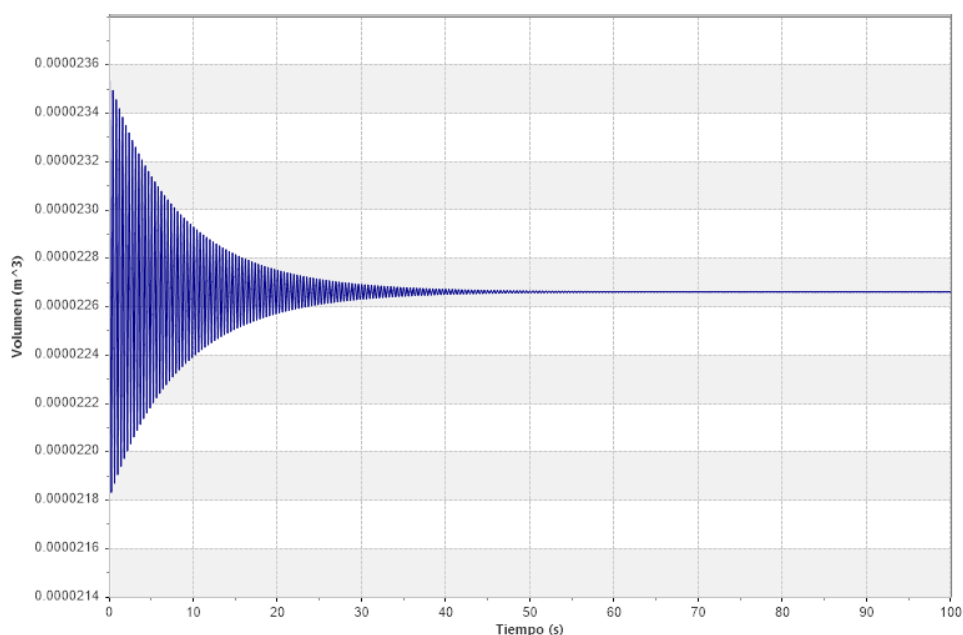


Gráfico 12. Volumen de gas al interior del TA E2

La presión máxima interior en este tanque es de 3.35 mca, al vaciarse el depósito las presiones de bombeo se reducen hasta que la presión sobre la cámara de aire únicamente es la diferencia de alturas con la tubería de elevación llena teniendo esta un valor de 2.78 mca.

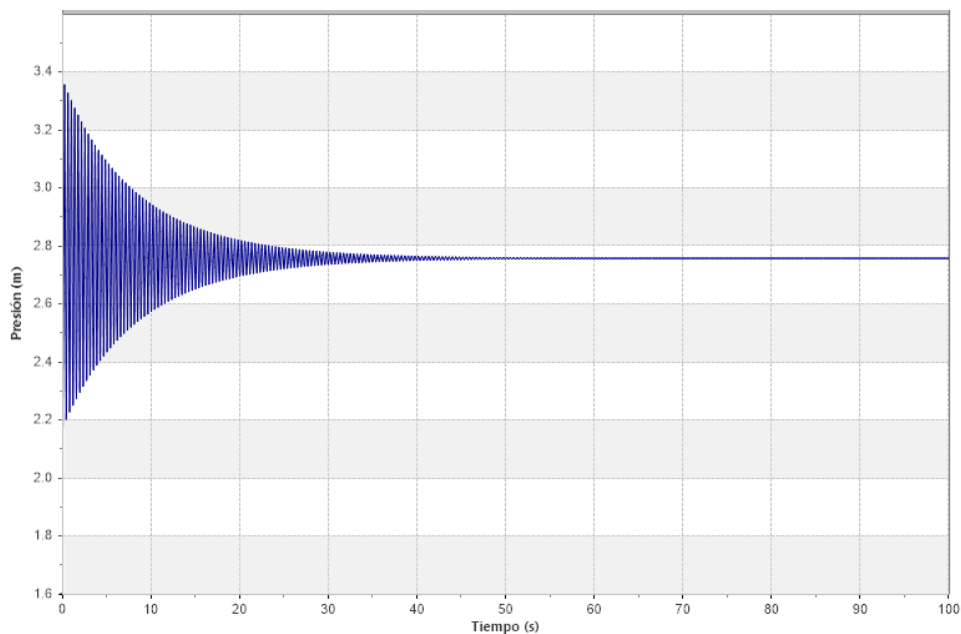


Gráfico 13. Presión al interior de TA E2

Al momento de bombeo, la presión genera un caudal de entrada hacía el tanque de aire, comprimiendo el gas en su interior, al descomprimirse este gas desplaza un volumen fuera de si provocando un caudal de salida, este ciclo forma un par de caudales de magnitud similar y signo contrario con tendencia a cero. Su valor máximo en este escenario es de .014 l/s.

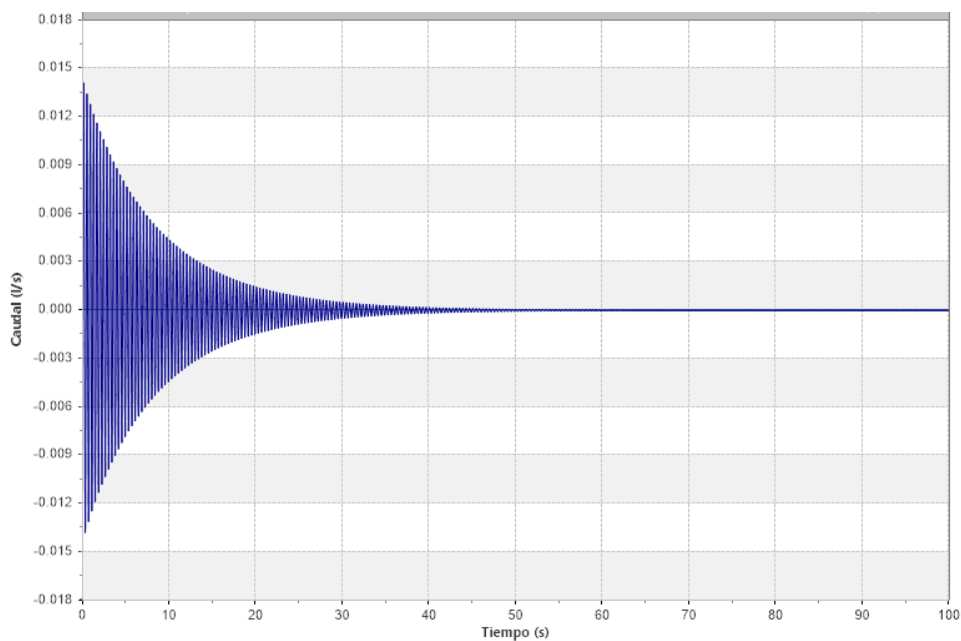


Gráfico 14. Caudal de entrada y salida en TA E2

Escenario 3

Para este segundo caso se contempla el uso de cámara de aire con un volumen de 51.46 cm^3 por lo que en los datos básicos de calderín se debe seleccionar la opción Act, además de esto se asigna la longitud de 20 cm.

Act	D (m)	L (m)
<input checked="" type="checkbox"/>	0.01905	0.2

Imagen 29. Condiciones de simulación en calderín E3

Las maniobras de las válvulas de impulsión se harán con los datos obtenidos del prototipo físico ensayado en el escenario 3 (Tabla 23).

Tabla 23 Datos de válvulas de impulsión E3

Cierres/minuto	Cierres/segundo	Tiempo total de maniobra	Tiempo de apertura	Tiempo de cierre
39.39	0.657	1.523	0.5	1.023

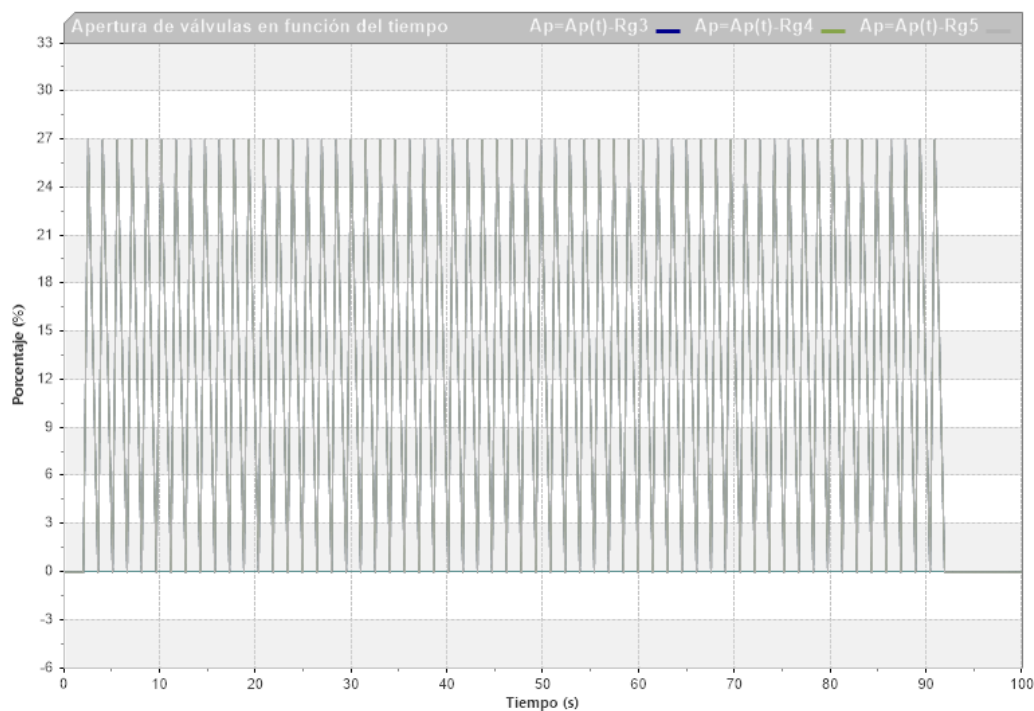


Gráfico 15. Apertura de válvulas en función del tiempo E3

Los promedios de cierre/minuto se utilizan para obtener el tiempo total de maniobra, es decir el tiempo que tardan las válvulas de impulsión estando completamente abiertas en cerrarse y nuevamente abrirse. Las válvulas al abrirse por acción de gravedad su tiempo de apertura es constante y se aproxima a 0.5 s, la diferencia entre el tiempo total de maniobra y el tiempo de apertura resulta en el tiempo de cierre-

Con estos datos de tiempo se hace la tabulación de las maniobras de cierre y apertura para las válvulas como se muestra en el Gráfico 15. Cuando la válvula se encuentra completamente cerrada se representa con una apertura de 0% y cuando se encuentra completamente abierta con una apertura de 27%, cada cierre en las válvulas significa una impulsión producto del golpe de ariete. El tiempo que tarda cada válvula en cerrar influye directamente en el volumen de agua desechado del sistema.

Resultados

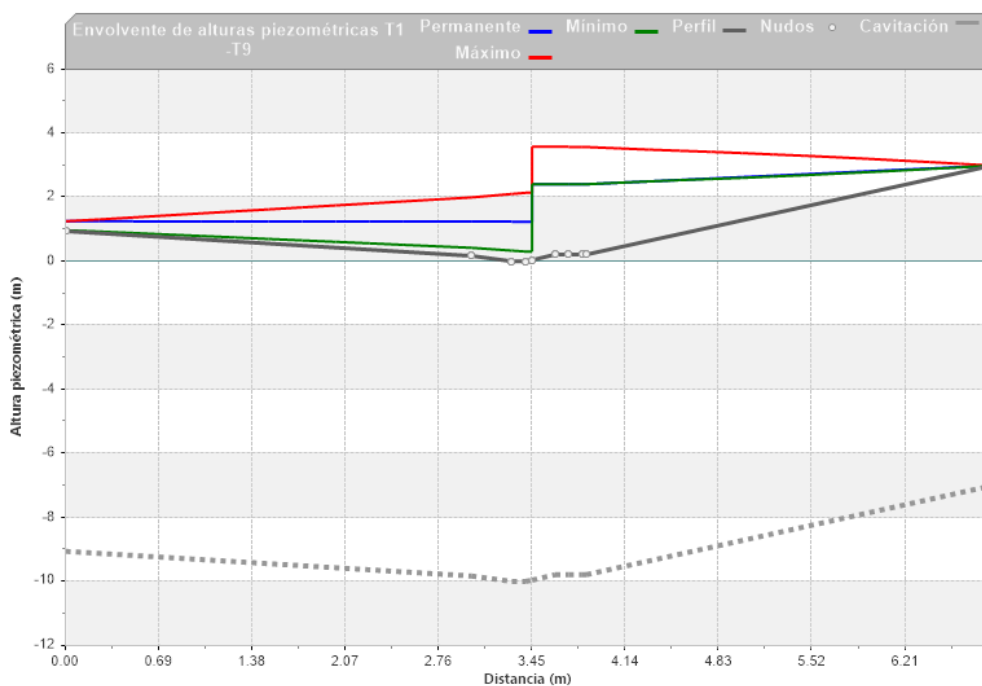


Gráfico 16. Envoltura de alturas piezométricas en E3

El Gráfico 16 representa las alturas piezométricas en mca a lo largo del sistema, siendo la distancia 0 m el inicio (tubería de alimentación). En este podemos encontrar la altura máxima indicada con una línea roja, la mínima con una línea verde, y la altura en condiciones iniciales con una línea azul. La línea gris representa el perfil del sistema por tuberías delimitadas con un punto blanco, desde la tubería de alimentación hasta la tubería de elevación.

El cuarto punto que se encuentra poco antes de la distancia de 3.45 m se encuentra la zona de válvulas de impulsión por lo que las presiones máximas en distancias menores son en sentido hacia el depósito y distancias posteriores en sentido de la elevación. Además, la línea punteada es un indicador de seguridad siendo que alturas piezométricas por encima al límite evita la presencia del fenómeno de cavitación y con ello rotura de la tubería.

En la gráfica de alturas piezométricas se lee el dato máximo obtenida de 3.59 mca después del bombeo contrastado con 1.26 mca iniciales sin bombeo.

El Gráfico 17 representa los caudales en l/s a lo largo del sistema, siendo la distancia 0 m el inicio (tubería de alimentación). En este podemos encontrar el caudal máximo indicado con una línea roja, el mínimo con una línea verde, y el caudal en condiciones iniciales con una línea azul.

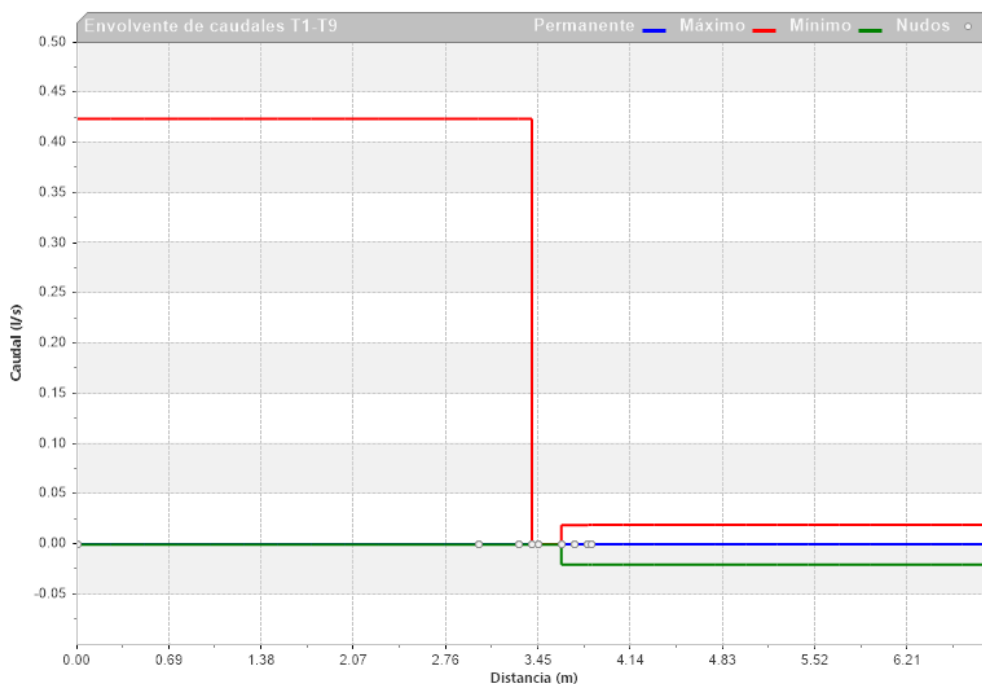


Gráfico 17. Envolvente de caudales en E3

El cuarto punto que se encuentra poco antes de la distancia de 3.45 m se encuentra la zona de válvulas de impulsión por lo que el caudal de las zonas anteriores es aportado por el depósito de alimentación mientras que el caudal de las zonas posteriores es aportado por el bombeo. Los valores negativos que se encuentra después de las válvulas de impulsión indican un flujo en sentido contrario. La gráfica muestra un caudal de 0.0195 l/s contrastado con un caudal de 0.49 l/s de entrada.

Con los valores obtenidos de ambas gráficas se obtiene la eficiencia de la Bomba de Ariete Hidráulico. Despejando y haciendo uso de la Ecuación 12 se obtiene una eficiencia de 11.33% para el escenario 1.

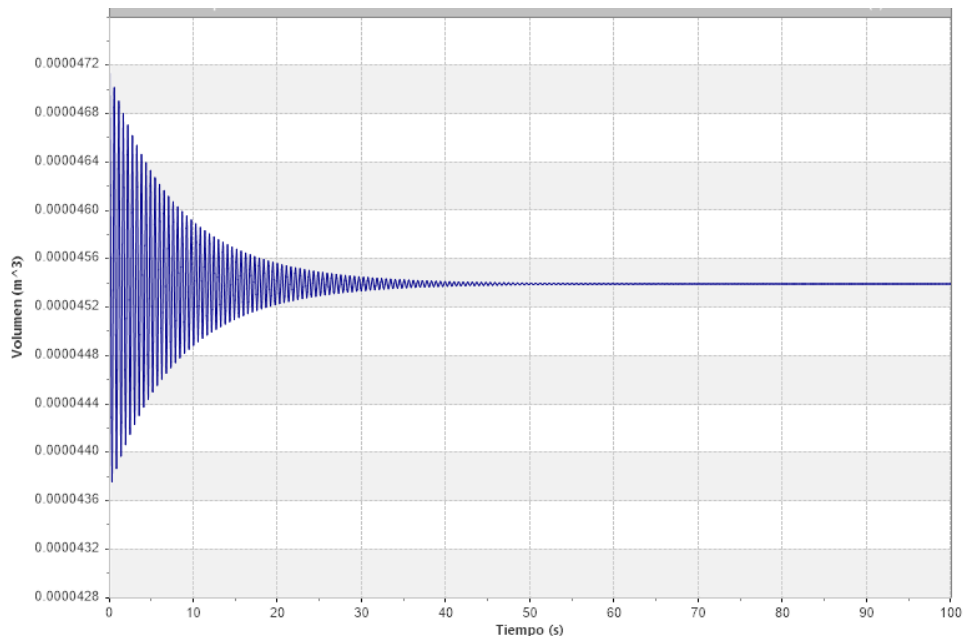


Gráfico 18. Volumen de gas al interior del TA E3

Para el tanque de aire de 51.46 cm^3 en la gráfica se muestra que el valor de volumen máximo de gas en su interior es de 47.00 cm^3 mientras que su valor mínimo es de 43.80 cm^3 , estos cambian y reducen hasta alcanzar una tendencia de 45.40 cm^3 . Dichas oscilaciones representan la compresión y descompresión del gas dentro del tanque de aire, provocado por la fuerza resultante de la sobrepresión.

La presión máxima interior en este tanque es de 3.34 mca, al vaciarse el depósito las presiones de bombeo se reducen hasta que la presión sobre la cámara de aire únicamente es la diferencia de alturas con la tubería de elevación llena teniendo esta un valor de 2.78 mca.

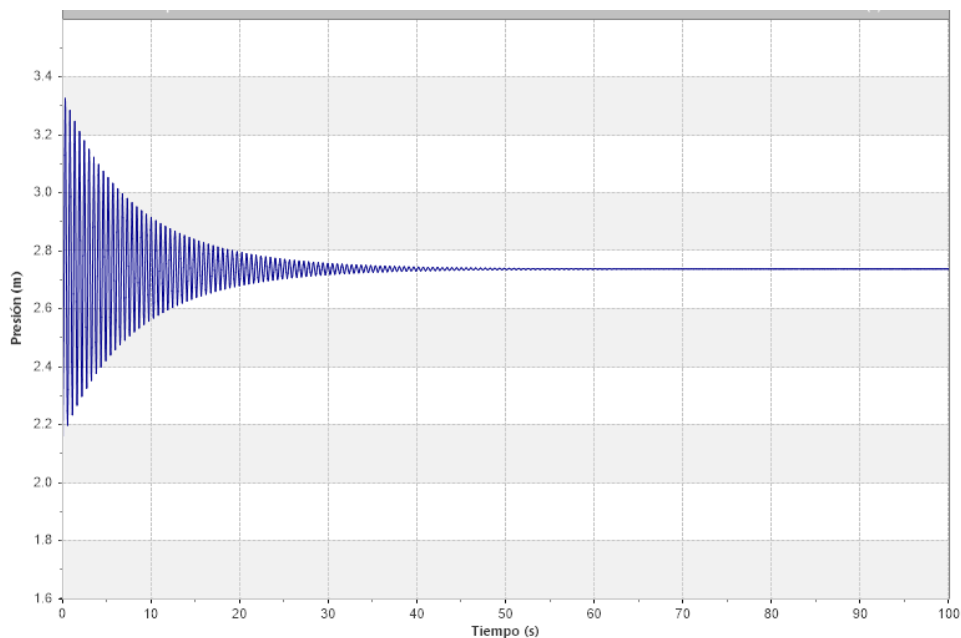


Gráfico 19. Presión al interior de TA E3

Al momento de bombeo, la presión genera un caudal de entrada hacía el tanque de aire, comprimiendo el gas en su interior, al descomprimirse este gas desplaza un volumen fuera de si provocando un caudal de salida, este ciclo forma un par de caudales de magnitud similar y signo contrario con tendencia a cero. Su valor máximo en este escenario es de .020 l/s.

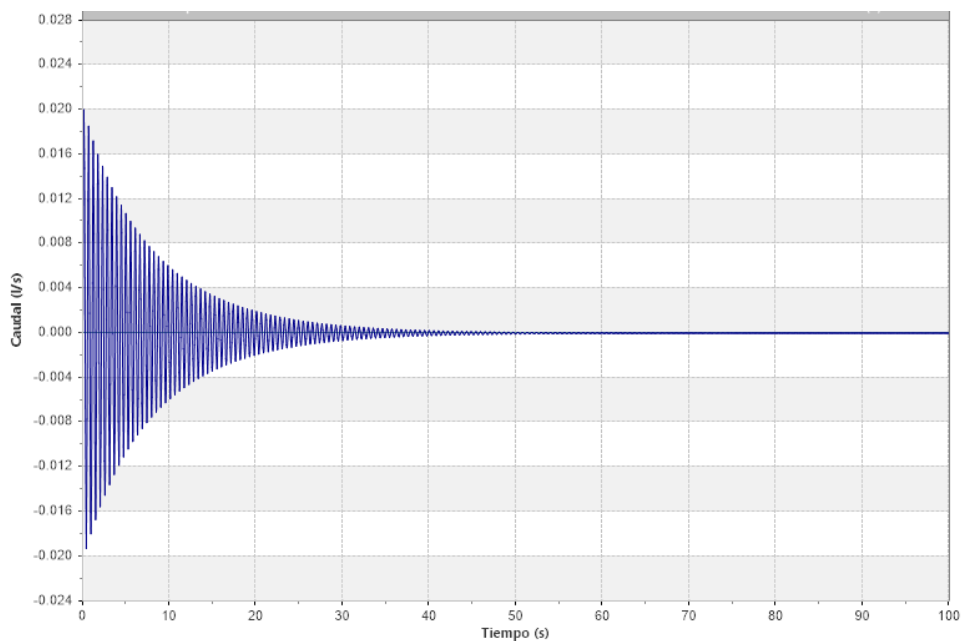


Gráfico 20. Caudal de entrada y salida en TA E3

Escenario 4

Para este segundo caso se contempla el uso de cámara de aire con un volumen de 77.19 cm^3 por lo que en los datos básicos de calderín se debe seleccionar la opción Act, además de esto se asigna la longitud de 30 cm.

Act	D (m)	L (m)
<input checked="" type="checkbox"/>	0.01905	0.3

Imagen 30. Condiciones de simulación en calderín E4

Las maniobras de las válvulas de impulsión se harán con los datos obtenidos del prototipo físico ensayado en el escenario 4 (Tabla 24).

Tabla 24 Datos de válvulas de impulsión E4

Cierres/minuto	Cierres/segundo	Tiempo total de maniobra	Tiempo de apertura	Tiempo de cierre
43.93	0.732	1.366	0.5	0.866

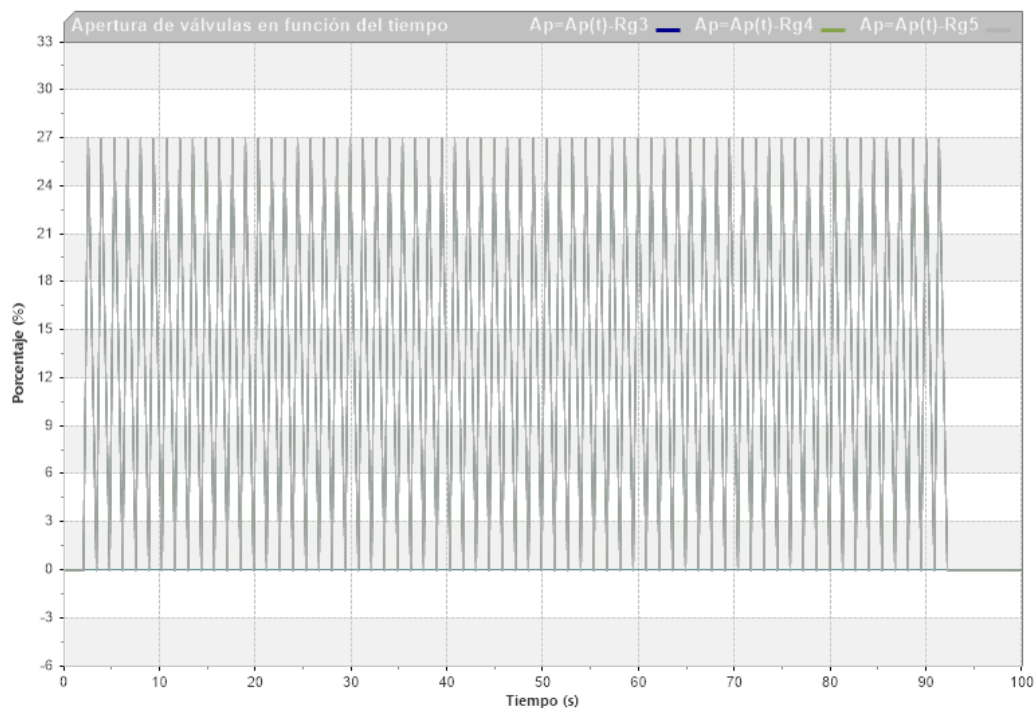


Gráfico 21. Apertura de válvulas en función del tiempo E1

Los promedios de cierre/minuto se utilizan para obtener el tiempo total de maniobra, es decir el tiempo que tardan las válvulas de impulsión estando completamente abiertas en cerrarse y nuevamente abrirse. Las válvulas al abrirse por acción de gravedad su tiempo de apertura es constante y se aproxima a 0.5 s, la diferencia entre el tiempo total de maniobra y el tiempo de apertura resulta en el tiempo de cierre.

Con estos datos de tiempo se hace la tabulación de las maniobras de cierre y apertura para las válvulas como se muestra en el Gráfico 21. Cuando la válvula se encuentra completamente cerrada se representa con una apertura de 0% y cuando se encuentra completamente abierta con una apertura de 27%, cada cierre en las válvulas significa una impulsión producto del golpe de ariete. El tiempo que tarda cada válvula en cerrar influye directamente en el volumen de agua desechado del sistema.

Resultados

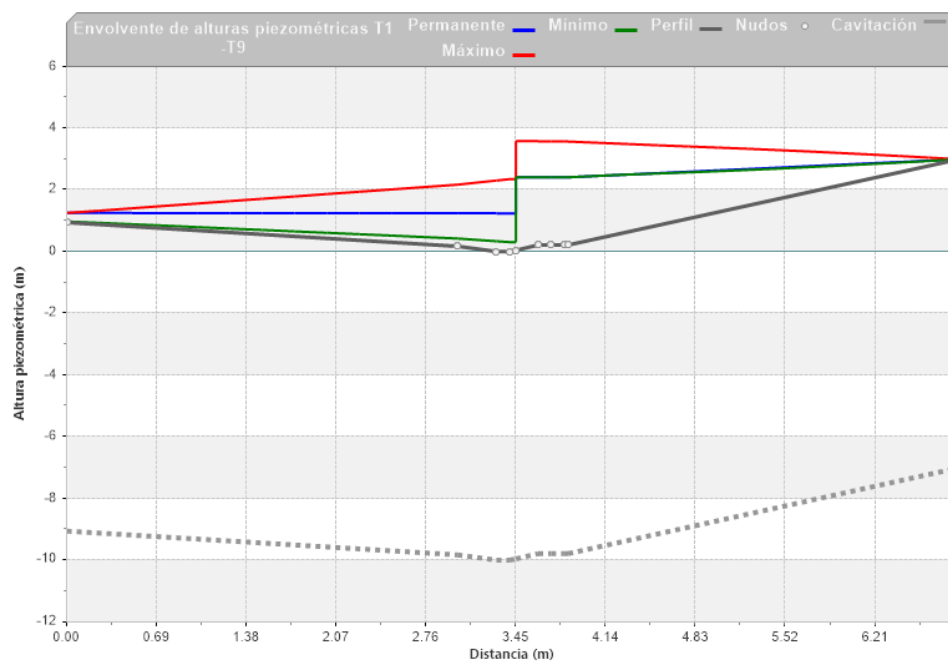


Gráfico 22. Envoltorio de alturas piezométricas en E4

El Gráfico 22 representa las alturas piezométricas en mca a lo largo del sistema, siendo la distancia 0 m el inicio (tubería de alimentación). En este podemos encontrar la altura máxima indicada con una línea roja, la mínima con una línea verde, y la altura en condiciones iniciales con una línea azul. La línea gris representa el perfil del sistema por tuberías delimitadas con un punto blanco, desde la tubería de alimentación hasta la tubería de elevación.

El cuarto punto que se encuentra poco antes de la distancia de 3.45 m se encuentra la zona de válvulas de impulsión por lo que las presiones máximas en distancias menores son en sentido hacia el depósito y distancias posteriores en sentido de la elevación. Además, la línea punteada es un indicador de seguridad siendo que alturas piezométricas por encima al límite evita la presencia del fenómeno de cavitación y con ello rotura de la tubería.

En la gráfica de alturas piezométricas se lee el dato máximo obtenida de 3.58 mca después del bombeo contrastado con 1.26 mca iniciales sin bombeo.

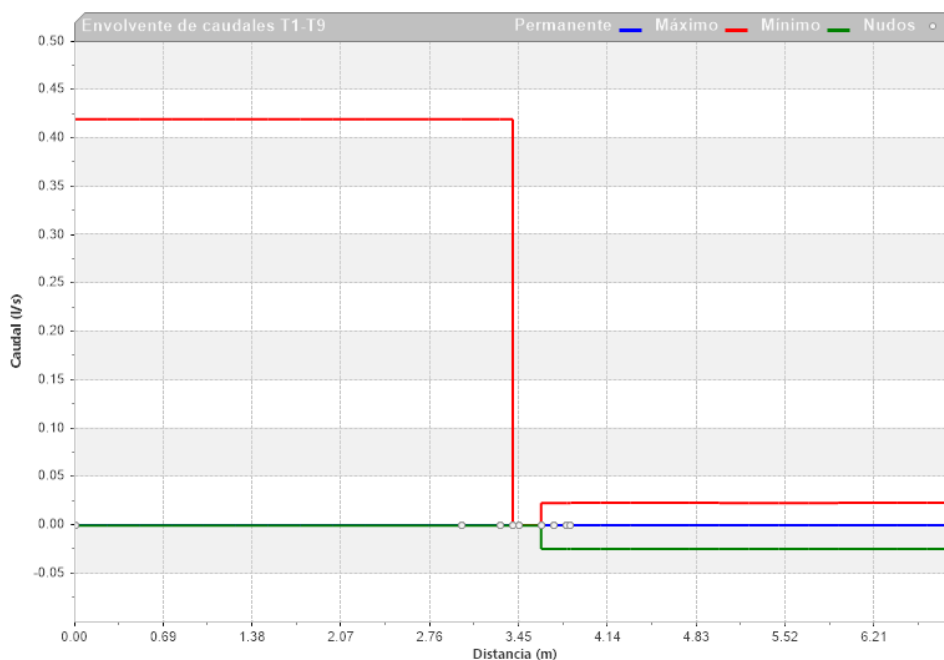


Gráfico 23. Envoltorio de caudales en E4

El Gráfico 23 representa los caudales en l/s a lo largo del sistema, siendo la distancia 0 m el inicio (tubería de alimentación). En este podemos encontrar el caudal máximo indicado con una línea roja, el mínimo con una línea verde, y el caudal en condiciones iniciales con una línea azul. El cuarto punto que se encuentra poco antes de la distancia de 3.45 m se encuentra la zona de válvulas de impulsión por lo que el caudal de las zonas anteriores es aportado por el depósito de alimentación mientras que el caudal de las zonas posteriores es aportado por el bombeo. Los valores negativos que se encuentra después de las válvulas de impulsión indican un flujo en sentido contrario. La gráfica muestra un caudal de 0.0233 l/s contrastado con un caudal de 0.49 l/s de entrada.

Con los valores obtenidos de ambas gráficas se obtiene la eficiencia de la Bomba de Ariete Hidráulico. Despejando y haciendo uso de la Ecuación 12 se obtiene una eficiencia de 13.51% para el escenario 1.

Para el tanque de aire de 77.19 cm^3 en la gráfica se muestra que el valor de volumen máximo de gas en su interior es de 70.5 cm^3 mientras que su valor mínimo es de 65.7 cm^3 , estos cambian y reducen hasta alcanzar una tendencia de 68.2 cm^3 . Dichas oscilaciones representan la compresión y descompresión del gas dentro del tanque de aire, provocado por la fuerza resultante de la sobrepresión.

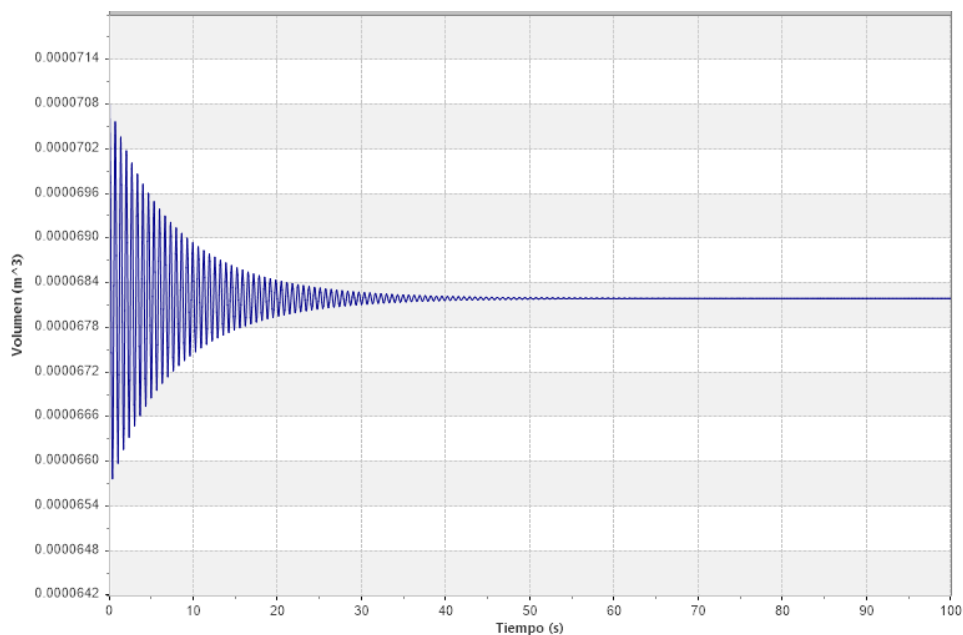


Gráfico 24. Volumen de gas al interior del TA E4

La presión máxima interior en este tanque es de 3.30 mca, al vaciarse el depósito las presiones de bombeo se reducen hasta que la presión sobre la cámara de aire únicamente es la diferencia de alturas con la tubería de elevación llena teniendo esta un valor de 2.78 mca.

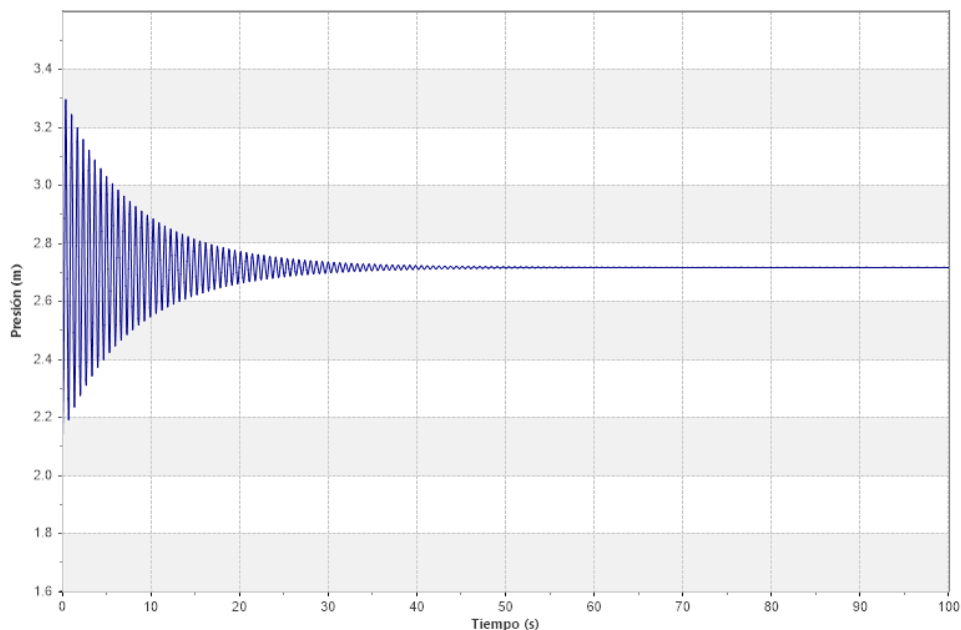


Gráfico 25. Presión al interior de TA E4

Al momento de bombeo, la presión genera un caudal de entrada hacía el tanque de aire, comprimiendo el gas en su interior, al descomprimirse este gas desplaza un volumen fuera de si provocando un caudal de salida, este ciclo forma un par de caudales de magnitud similar y signo contrario con tendencia a cero. Su valor máximo en este escenario es de .014 l/s.

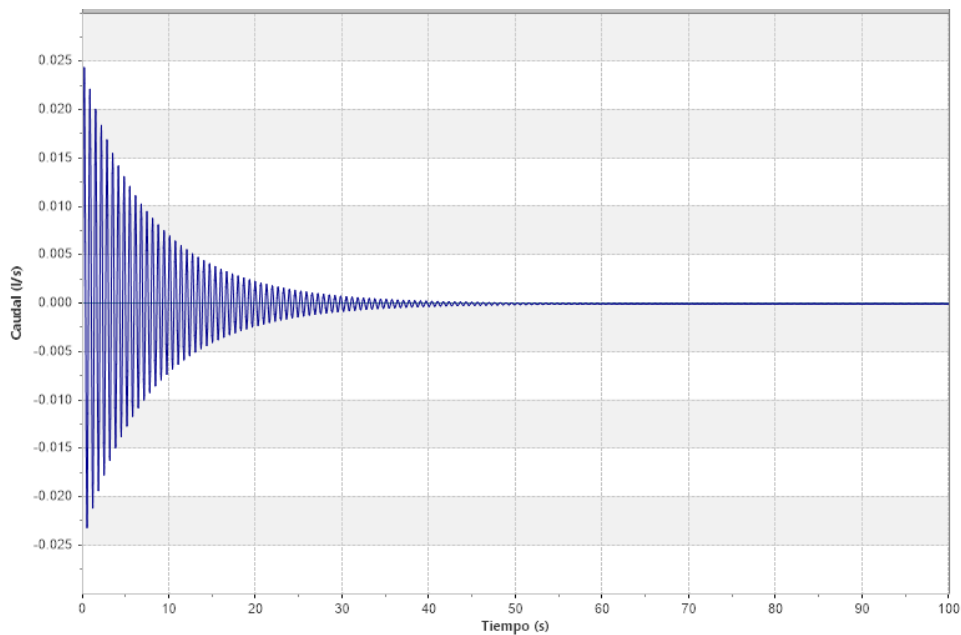


Gráfico 26. Caudal de entrada y salida en TA E4

Comparación de resultados: prototipo y modelo digital.

Ambos resultados presentan las mismas tendencias con el aumento del volumen en el tanque de aire, se nota el aumento en el caudal de salida (q) lo que es directamente proporcional al valor de la eficiencia.

Tabla 25. Resultados de prototipo. Fuente: propia (2025)

Resultados de prototipo				
Escenario	q (l/s)	h (mca)	Volumen tanque de aire (cm^3)	Eficiencia
E1	0.00463	5.8	0	4.6%
E2	0.00497	6.5	25.73	5.6%
E3	0.00714	5.3	51.46	6.5%
E4	0.00835	5.5	77.19	7.9%

Para los resultados del software se debe considerar que el caudal es el máximo y no es constante, este se presenta a manera de pulsos.

Tabla 26. Resultados en software Allievi Fuente: propia (2025)

Resultados de software				
Escenario	q (l/s)	h (mca)	Volumen tanque de aire (cm^3)	Eficiencia
E1	0.0029	3.58	0	1.7%
E2	0.0142	3.60	25.73	8.3%
E3	0.0195	3.59	51.46	11.3%
E4	0.0233	3.58	77.19	13.5%

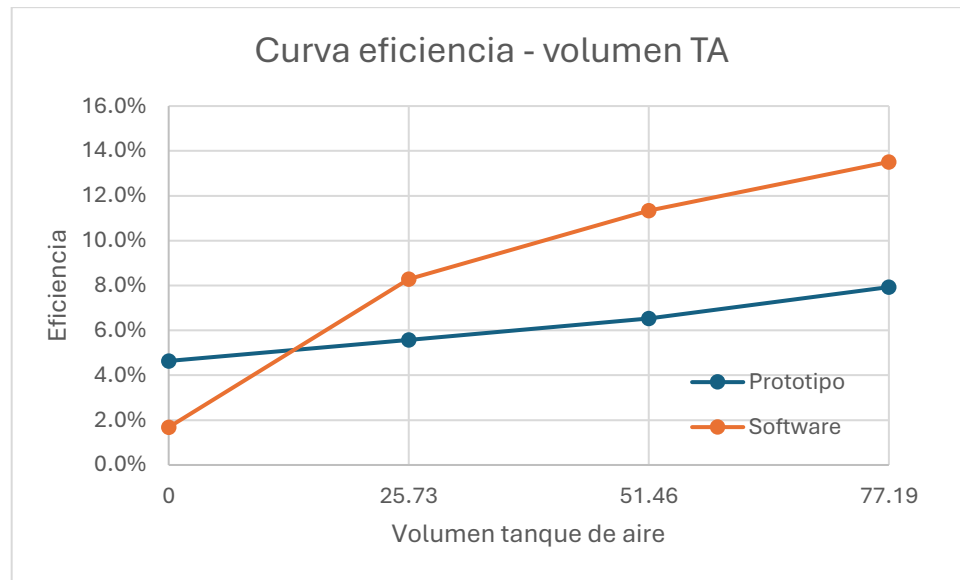


Gráfico 27. Curva eficiencia-volumen tanque de aire

En el Gráfico 27 se muestra la variación de la eficiencia para los distintos casos con variación del volumen en el tanque de aire, entre el prototipo físico y los datos obtenidos por simulación en el software Allievi. Se nota como ambas líneas de tendencia aumentan proporcionalmente al volumen del tanque de aire. La variación principalmente es debido al caudal obtenido, el cual, para el caso de no utilizar una cámara de aire, el prototipo físico tuvo una mejor respuesta que la simulación, mientras que, en los casos posteriores con cámara de aire, la simulación tuvo una mayor eficiencia, esto porque para los datos considerados de simulación fue el caudal máximo, mientras que en el prototipo fue en función de un aforo del volumen de agua obtenido en la salida durante el tiempo de la prueba.

CONCLUSIONES

Al modelar el sistema de bombeo con Bomba de Ariete Hidráulico en el software Allievi se obtuvo el comportamiento del tanque de aire y como el aumento de su volumen afecta al sistema. El volumen del tanque de aire modifica el comportamiento de la bomba de ariete hidráulico, en tres aspectos, el tiempo de cierre de las válvulas de impulsión, la presión generada por el bombeo y el caudal de elevación.

Al aumentar el volumen del tanque de aire modificando su longitud, el caudal de elevación también aumenta significativamente, siendo esta respuesta el cambio más relevante para el caso al ser directamente proporcional a la eficiencia. En el escenario 1 donde no se utiliza un tanque de aire, tiene una eficiencia del 1.7% a razón de un caudal de salida con valor de 0.0029 l/s, esta respuesta del sistema aumenta progresivamente durante escenarios posteriores hasta que en el escenario 4, en el cual se usa un tanque de aire de 10 cm de altura correspondiente a un volumen de 77.19 cm³, la eficiencia alcanza el 13.5% con un caudal de salida de .0233 l/s, esto representa un aumento en la eficiencia del 794% con respecto al escenario 1.

- El aumento de la eficiencia no es constante entre escenarios, pero mantiene una tendencia de aumento, entre los escenarios 1 y 2 el aumento es de 488%, entre los escenarios 2 y 3 es de 136% y entre los escenarios 3 y 4 es de 119%.
- El aumento del caudal de salida tiene prácticamente los mismos patrones de aumento que la eficiencia teniendo un valor de 803% en comparación del escenario 4 con el escenario 1.
- El tiempo de cierre de las válvulas de impulsión tiende a subir desde el escenario 1 hasta el escenario 3, después en el escenario 4 se nota un descenso en dicho tiempo. Siendo esta zona de válvulas la principal para el funcionamiento del sistema al proporcionar un caudal de salida y sobrepresión con cada cierre hace notar que la cámara de aire también tiene un papel importante, siendo que si todo fuera a causa de las válvulas de impulsión dicho cierre tendría una tendencia semejante al de la eficiencia.
- La presión máxima en el sistema entre los escenarios es muy parecida relativamente, tuvo su valor máximo en el escenario 2 siendo de 3.60 mca, siendo este un aumento comparado con el escenario 1 con 3.58 mca y con una caída de una centésima en los escenarios 3 y 4 hasta llegar a 3.58 mca nuevamente en este último.

Con los resultados obtenidos del escenario 4, siendo este el que presentó mejores resultados hace una proyección de su funcionamiento a lo largo de un año ininterrumpidamente. En un día puede bombear poco más de 2000 litros y al año bombear 734 mil 788 litros. Si se compara con una bomba de 1/6 de caballo de fuerza la cual puede bombear 25 l/minuto, para bombear la misma cantidad de agua es necesario el consumo de 59.0 kwh al año, que en un esquema de cobro domestico son alrededor de \$73.03 mxn. El sistema de Bomba de Ariete Hidráulico al no utilizar energía eléctrica directamente se refleja en un ahorro de los costos operativos, además en zonas sin acceso a energía eléctrica, tampoco es necesaria la quema de combustibles para su uso ni en el de un generador para alimentarlo, evitando la producción de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero.

El uso del sistema de Bomba de Ariete Hidráulico, junto con el incremento de su eficiencia, demuestra que se trata de un sistema funcional capaz de cubrir ciertas demandas de abastecimiento de manera sostenible. Con el cambio en la longitud de la cámara de aire se logró un aumento significativo en la eficiencia de la bomba de ariete hidráulico, lo que evidencia cómo un adecuado dimensionamiento mejora los resultados manteniendo las mismas condiciones iniciales. Su principio de operación basado en energías verdes y limpias la posiciona como una alternativa complementaria al uso de la electricidad, contribuyendo de manera significativa al cuidado del medio ambiente y al bienestar futuro. Además, su implementación refleja un proceso de mejora continua, orientado a optimizar los recursos hídricos y energéticos en beneficio de la sociedad y del planeta. En conclusión, la bomba de ariete hidráulico representa una tecnología viable, eficiente y sustentable, cuyo perfeccionamiento fortalece la transición hacia sistemas energéticos más responsables y respetuosos con el entorno.

RECOMENDACIONES

Para mantener la eficiencia del sistema es necesario mantener el uso de materiales resistentes a la deformación y la fatiga, esto aplica para el cuerpo de la bomba y válvulas de retención usadas para las válvulas de impulsión y la válvula antirretorno. En las condiciones iniciales, la altura de alimentación no deberá ser menor a un metro y la tubería de alimentación deberá estar a sección llena, también se recomienda que el agua que entra al sistema deberá estar libre de sólidos grandes que puedan bloquear o afectar el flujo o el cierre de las válvulas, haciendo uso de rejillas, filtros y desarenadores. Además, se recomienda hacer una obra de recuperación del agua desechada, la cual se puede regresar aguas debajo de la toma. La tubería de salida se recomienda que alimente al depósito correspondiente a descarga libre por encima de su nivel de agua máximo.

En el caso de aumentar la dimensión de la cámara de aire, se podrá calibrar el tiempo de cierre de las válvulas añadiendo peso en ellas. Además, se debe revisar que el cierre de las válvulas sea uniforme y hermético.

Para sistemas con requerimientos mayores de entrega, es recomendable hacer uso de tubería de acero al carbono y tener conexiones por medio de bridas. Además, es recomendable hacer el uso de válvulas manufacturadas.

REFERENCIAS

- Aqua Systems. (25 de octubre de 2023). *Sistema de Bombeo de Agua*.
<https://www.aqua.com.mx/blog/sistema-de-bombeo-de-agua>
- Campaña, C., y Guamán, D. (2011). *Academia.edu*. TESIS. Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico:
https://www.academia.edu/25095903/DISE%C3%91O_Y_CONSTRUCCI%C3%93N_DE_UNA_BOMBA_DE_ARIETE_HIDR%C3%81ULICO
- Chavarro V., P. A. (s.f.). *Economía circular en el sector de agua potable y saneamiento: Aprovechamiento de metano y eficiencia energética en minucipios seleccionados de México*. Eficiencia Energética en el sector de Agua de Saneamiento.
- Cobos, R. (s.f.). *Hotmart*. Arranca con Bombas de Ariete de Cero a la Maestría:
<https://hotmart.com/es/club/hidraulica-y-bombas-ruben-cobos>
- Comisión Federal de Electricidad. (08 de Enero de 2025). *Diario Oficial de la Federación*. Acuerdo Núm. A/158/2024: Acuerdo de la Comisión Reguladora de Energía autoriza el cálculo y ajuste de tarifas finales que aplicará de manera individual a CFE Suministrador de Servicios Básicos y determina la tarifa regulada para los servicios conexos no i:
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5747760
- Comisión Nacional del Agua. (s.f.). Resumen del Programa Nacional Hídrico 2020-2024.:
https://datos.conagua.gob.mx/DatosAbiertos/PNH_Resumen.pdf
- Comisión Nacional del Agua. (02 de Enero de 2019). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Biblioteca Digital de MAPAS:
<https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro15.pdf>
- Comisión Nacional del Agua. (Octubre de 2022). Estadísticas del Agua en México 2021:
<https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM%202021.pdf>
- Comisión Nacional del Agua. (07 de Agosto de 2024). *Estadísticas agrícolas de los distritos de riego*. Superficies regadas y volúmenes distribuidos por distrito de riego 1998 – 2023:
https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fwww.gob.mx%2Fcms%2Fuploads%2Fattachment%2Ffile%2F936320%2FSUPERFICIES_REGADAS_Y_VOLUMENES_1998-2023.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK

- Comisión Nacional del Agua. (s.f.). *Obra pública e infraestructura*.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (Diciembre de 2011). Estudio de sistemas de bombeo agropecuario en México.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (2011). Estudio de sistemas de bombeo agropecuarios en México.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (30 de Junio de 2014). *Gobierno de México*. Estados y Municipios: Bombeo de agua potable municipal: <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/estados-y-municipios-bombeo-de-agua-potable-municipal?state=published>
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (30 de Junio de 2014). *Gobierno de México*. Estados y Municipios: Bombeo de agua potable municipal: <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/estados-y-municipios-bombeo-de-agua-potable-municipal>
- El Colegio de México. (2019). *Análisis de las tarifas eléctricas en los sistemas de agua potable y saneamiento de México*.
- García Luna, C. (06 de Febrero de 2025). *Programa de Ordenamiento de Concesiones*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua.
- Gobierno de México. (s.f.). *Plan Nacional de Desarrollo 2025-2030*.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. (1997). *Google Books*. IV reunión Nacional sobre sistemas de captación de lluvia: https://www.google.com.mx/books/edition/IV_Reuni%C3%B3n_Nacional_sobre_sistemas_de_C/9byKgeW4mr4C?hl=es-419&gbpv=1&dq=bomba+de+ariete&pg=PA102&printsec=frontcover
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Encuesta Nacional Agropecuaria 2019 (ENA 2019)*.
- Mancebo del Castillo, U. (1994). *Teoría del golpe de ariete y sus aplicaciones en ingeniería hidráulica*. México: Limusa.
- Martin, C. S. (2008). WATERHAMMER. En I. J. Karassik, M. Joseph P. , P. Cooper, y C. Heald, *Pump Handbook*, (4th Edition ed.). McGraw-Hill.
- Mejía Rojas, A. (2023). *Repositorio*. Variación de la eficiencia hidráulica en bombas de ariete con una, dos y tres válvulas de pie: <https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/6334/TESIS-ALEXANDER%20MEJ%c3%8da%20ROJAS.pdf?sequence=1>

- Mendiluce, R. F. (1987). *El golpe de ariete en impulsiones* (2da ed.). Madrid: Bellisco.
- México Presidencia de la República. (21 de Noviembre de 2024). Plan Nacional Hídrico 2024-2030.
- Pérez, M. (s.f.). *Bombeo de Ariete Hidráulico*.
https://bombariete.blogspot.com/2019/03/indice_8.html
- Registro Público de Derechos de Agua. (2023). *SINA 3.0*.
<https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/SINA/?opcion=RegionesH>
- Secretaría de Energía. (Octubre de 2017). *Gobierno de México*. Ventas internas de energía eléctrica por tarifa:
https://base.energia.gob.mx/dgaic/DA/P/DGPlaneacionInformacionEnergeticas/VentasInternasEnergiaElectricaTarifa/SENER_05_VentasInternasEnergiaElectricaPorTarifa-IIIA3C05.csv
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (25 de Septiembre de 2018). *Gobierno de México*.
<https://www.gob.mx/semarnat/articulos/beneficios-de-usar-energias-renovables-172766>
- Subsecretaría de Planeación y Transición Energética. (2025). *Gobierno de México*. Balance Nacional de Energía 2023:
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/977268/Balance_Nacional_de_Energ_a_2023.FINAL06.02.2025.1.pdf
- Universidad Politécnica de Valencia. (2018). *Manual técnico ALLIEVI (Versión 3.0.0)*. Valencia: ALLIEVI.
- Zerna Quinteros, M. A. (s.f.). *Academia*. Bomba de ariete hidráulico:
https://www.academia.edu/28326747/Bomba_de_ariete_hidraulico